



## ابرمومسانی فولادهای زنگ نزن دو فاز $\gamma/\alpha$

امین کلاه‌دوز<sup>۱</sup>، مهدی دشتی<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول: [aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir](mailto:aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله مطالعات انجام شده در خصوص ابرمومسانی فولادهای زنگ نزن دو فاز  $\gamma/\alpha$  مورد بررسی قرار گرفته است. هدف بدست آوردن مناسب‌ترین شرایط عملیات ترمومکانیکی جهت ریزکردن ساختار (اندازه دانه) و القای خاصیت ابرمومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فاز است. همچنین نشان دادن محدوده مناسب دمایی و نرخ کرنش مورد استفاده در فرآیند ابرمومسانی این نوع فولادها جهت بدست آوردن حداکثر ازدیاد طول می باشد. نتایج نشان می دهد که با استفاده از عملیات ترمومکانیکی شامل حل سازی، نورد و آنیل می توان به اندازه دانه‌هایی تا  $4\text{-}0.5\ \mu\text{m}$  دست یافت. بیشترین ازدیاد طول در حدود  $1.1\%$  در محدوده دمایی  $800\text{-}1000^\circ\text{C}$  و نرخ کرنش  $1\text{-}0.1\ \text{s}^{-1}$  بدست می آید. تحت این شرایط ضریب حساسیت به نرخ کرنش در حدود  $0.6$  می باشد.

### واژه‌های کلیدی

فولاد زنگ نزن دو فاز  $\gamma/\alpha$ ، سرخوردن  
مرز دانه ها، ابر مومسانی، فاز  $\gamma$ ، فاز  $\alpha$

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران.

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران.

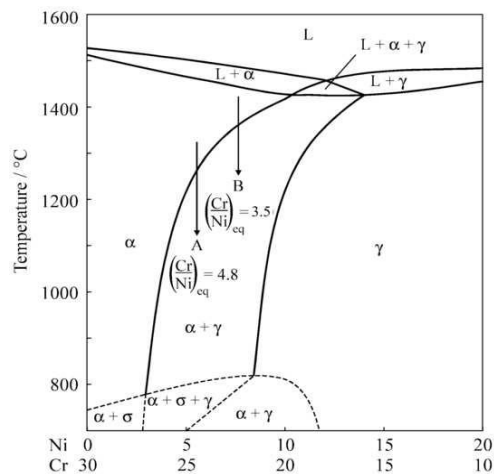
## ۱- مقدمه

ابر مومسانی توانایی مواد پلی کریستالی، جهت ازدیاد طول بسیار زیاد تا قبل از شکست در دماهای بالا می باشد ( $T > 0.5T_m$ ). علاقه مندی به تغییر شکل ابر مومسان به علت مشاهدات این پدیده در محدوده وسیعی از مواد که تغییر شکل آنها بوسیله روش های معمولی شکل دادن مشکل می باشد، افزایش یافته است. ویژگی تغییر شکل ابرمومسانی ازدیاد طول های بیشتر از ۲۰۰٪ می باشد که منجر به تولید قطعات پیچیده ای مانند اتصالات لوله ها و شیرها با استفاده از هزینه کم می شود. در مواد ابرمومسان ازدیاد طول، به تنش سیلان و به مقدار زیاد به اندازه دانه وابسته است، بطوری که هرچه دانه های اولیه ریزتر باشند ازدیاد طول بیشتر است. در نتیجه جهت ریز کردن دانه های این مواد استفاده از فرآیندهای ترمومکانیکی بهترین روش می باشد. در همین راستا گیبسون و میهارا از فرآیندهای ترمومکانیکی جهت ریز کردن ساختار فولادهای زنگ نزن دو فازی استفاده کرده و به اندازه دانه های  $1-2 \mu\text{m}$  دست یافتند [۷-۱۰]. معمولاً در حین فرآیند ابر مومسانی حفره دار شدن نیز مشاهده می شود که این امر به دلیل ایجاد تمرکز تنش در نقاط سه گانه و لبه های مرز دانه ها بوده، و ناشی از سر خوردن این مرزها و آزاد نشدن این تنش ها بطور کامل می باشد، که منجر به تشکیل، رشد و به هم پیوستن حفره ها شده و در هنگامی که نمونه تحت کشش قرار می گیرد به دلیل بوجود آمدن این حفره ها می شکنند [۱۱، ۱۴].

هان و همکارانش [۵] تغییرات ریز ساختار در حین فرآیند ابرمومسانی فولاد زنگ نزن دو فازی Fe-24Cr-7Ni-3Mo-0.14N را مورد بررسی قرار دادند و به ۷۵٪ افزایش طول، در دمای  $850^\circ\text{C}$  و نرخ کرنش  $3/16 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  دست یافتند. اوسادا و همکارانش [۹] فرآیند ابرمومسانی فولاد زنگ نزن دو فازی با ترکیب Fe-25.06Cr-6.53Ni-3.22Mo-0.12N را مورد بررسی قرار داده و در محدوده دمایی  $1000^\circ\text{C}$  -  $950^\circ\text{C}$  و نرخ کرنش  $1/67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  -  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  به ۵۰٪ افزایش طول دست یافتند.

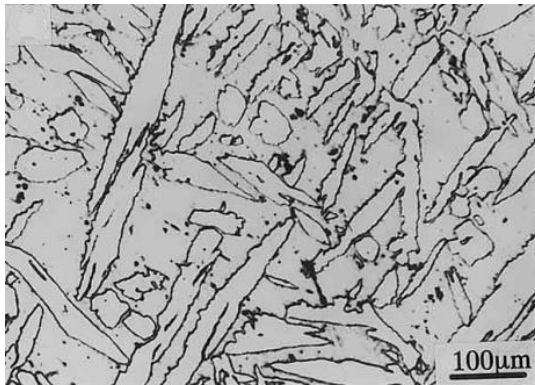
میهارا [۱۰] فرآیند ابرمومسانی را در فولاد زنگ نزن دو فازی با ترکیب Fe-25.12Cr-7.02Ni-2.9Mo-0.12N

فولادهای زنگ نزن دو فازی دسته ای از مواد دو فازی با ریز ساختار آستنیت و فریت هستند که شامل مقادیر زیادی Cr و Ni بوده و ترکیبی از خصوصیات فولادهای زنگ نزن تک فازی فریتی و آستنیتی را تولید می کنند. اخیراً به دلیل کاهش هزینه های تولید در این فولادها و همچنین بدلیل داشتن استحکام بالا و مقاومت خوب در برابر خوردگی و سایش این نوع فولادها مورد توجه بسیار قرار گرفته اند. کاربردهای عمده این فولادها عموماً در صنایع پتروشیمی و ساختمانی می باشد. در شکل (۱) تغییر فاز در فولادهای زنگ نزن دو فازی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، فاز  $\alpha$  زیر دمای ذوب رسوب کرده و در زیر دمای  $1400^\circ\text{C}$  تغییر فاز  $\alpha$  به  $\alpha+\gamma$  رخ می دهد و در محدوده دمایی  $700$  تا  $800$  درجه سانتیگراد یک واکنش یوکتوئید وجود دارد که از طریق آن فاز  $\alpha$  به فازهای  $\gamma$  و  $\sigma$  تبدیل می شود. تشکیل فاز ترد  $\sigma$  در محدوده دمایی  $450$  تا  $800^\circ\text{C}$  منجر به کاهش خواص مکانیکی این مواد در دماهای پایین شده و در نتیجه شکل پذیری گرم را در این فولادها دچار مشکل می کند. یکی از روشهای افزایش شکل پذیری در این آلیاژها استفاده از فرآیند های تغییر شکل ابرمومسانی است. لذا در ادامه توضیح مختصری در مورد فرآیند ابرمومسان و عملیات ترمومکانیکی ارائه شده و سپس چگونگی انجام آنها در فولادهای زنگ نزن دو فازی مورد بررسی قرار می گیرد [۶-۱].



شکل ۱: نمودار شبه دو تایی Fe-Cr-Ni شامل ۷۰٪ آهن [۳].

الف ضروری است. اما ماکه در تحقیقاتش نشان داد که ساختار دو فازی مناسب جهت ابرمومسانی را در این فولادها بوسیله عملیات ساده ای شامل انجام نورد سرد روی نمونه اولیه و سپس آنیل کردن آن در منطقه دو فازی  $\alpha+\gamma$  بدون عملیات انحلالی اولیه، مانند شکل (۳ب) می توان بدست آورد. اما جهت دستیابی به حداکثر افزایش طول، استفاده از فرآیند اول به دلیل همگن تر و ریز دانه تر بودن ساختار، مناسب تر می باشد [۱۳].



(الف)



(ب)

شکل (۲) تصویر میکروسکوپی از ساختار  $\alpha+\gamma$  که با عملیات حرارتی مختلف شکل گرفته است. (الف) سرد کردن در کوره از دمای  $1300^{\circ}\text{C}$ . (ب) سرد کردن در آب از دمای  $1300^{\circ}\text{C}$  و سپس پیر کردن در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  [۱۳].

توجه به این نکته ضروری است که به دلیل رسوب فازهای مختلف در حین عملیات انحلالی، این بخش از فرآیند می تواند بر روی افزایش طول نهایی در فرآیند ابرمومسانی موثر باشد. جهت بررسی این موضوع محققان نمودار دمای تغییر شکل - افزایش طول و دمای تغییر شکل - تنش را در دماهای انحلالی متفاوت رسم کرده و به بررسی اثرات دمای فرآیند انحلالی می پردازند. به عنوان مثال در شکل (۴) همانطور که

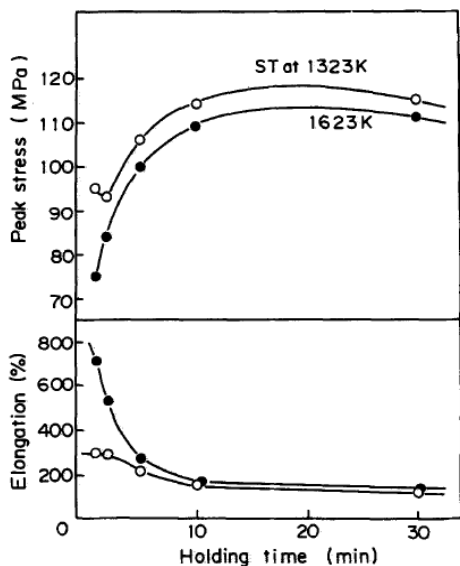
مورد بررسی قرار داده و  $1000\%$  افزایش طول را در دمای  $980^{\circ}\text{C}$  و نرخ کرنش  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  بدست آورد.

در این مقاله پژوهش های انجام گرفته در مورد ابرمومسانی فولادهای زنگ نزن دو فازی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف بدست آوردن مناسب ترین شرایط ترمومکانیکی و ابرمومسانی جهت این مواد می باشد. برای این منظور در ادامه ابتدا انواع عملیات ترمومکانیکی بررسی شده و سپس فرایند ابرمومسان و تغییرات ساختار در حین آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- عملیات ترمومکانیکی

در شکل (۱) نمودار فازی یک فولاد زنگ نزن دو فازی نشان داده شده است. زمانی که فولاد زنگ نزن دو فازی از منطقه تک فاز  $\alpha$  به آهستگی و یا به سرعت سرد می شود ساختارهای نشان داده شده در شکل (۲) حاصل می شوند. در شکل (۲الف) که نمونه آهسته سرد شده است به دلیل تشکیل ساختار دو فازی درشت، و در شکل (۲ب) که نمونه سریع سرد شده و سپس در منطقه دو فازی پیر شده است به دلیل وجود دانه های درشت  $\alpha$  و رسوبات فاز  $\gamma$ ، ساختارهای فوق جهت انجام فرآیند ابرمومسانی مناسب نمی باشند. در نتیجه جهت بدست آوردن ساختار دو فازی ریز دانه تر انجام عملیات ترمومکانیکی لازم و ضروری است. عملیات ترمومکانیکی مورد استفاده عموماً شامل نورد گرم در محدوده دمایی  $1100-1300^{\circ}\text{C}$  و در پی آن نورد سرد با  $50\%$  کاهش ضخامت است که منجر به بوجود آمدن دانه های با قطر  $1-3 \mu\text{m}$  می شود. در شکل (۳) دو نوع از عملیات ترمومکانیکی که عموماً روی فولادهای زنگ نزن دو فازی انجام می شود نشان داده شده است. جهت ایجاد خاصیت ابرمومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فازی این باور اولیه وجود داشت که فرآیندی شامل، عملیات انحلالی نمونه فورج شده در دمایی بالاتر از منطقه تک فاز  $\alpha$  و سپس کوئنچ کردن آن جهت بدست آوردن ساختاری اشباع از  $\alpha$ ، و بعد از آن تحت نورد سرد قرار دادن نمونه و در نهایت پیر کردن آن در ناحیه دو فازی  $\alpha+\gamma$ ، مانند شکل ۳

دقیقه)، تنش افزایش یافته و افزایش طول حاصله در حین فرآیند ابرمومسانی به کمتر از ۳۰٪ می رسد. علت این امر رسوب فاز ترد  $\sigma$  می باشد که در بخش های بعدی توضیح داده می شود [۱۶، ۱۴، ۱۰].

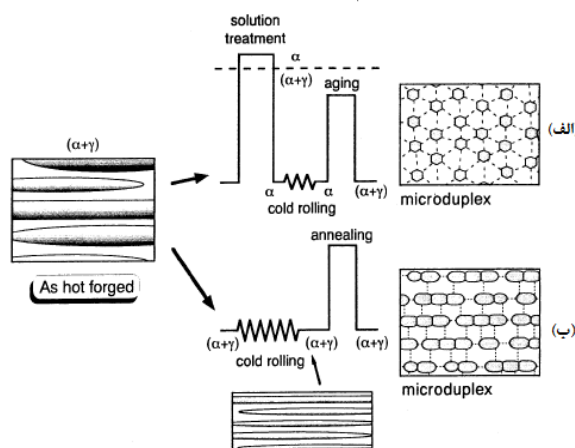


شکل (۵) تاثیرات زمان نگهداری قبل از تغییر شکل بر روی مشخصات کشش در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  در نرخ کرنش  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  [۱۰].

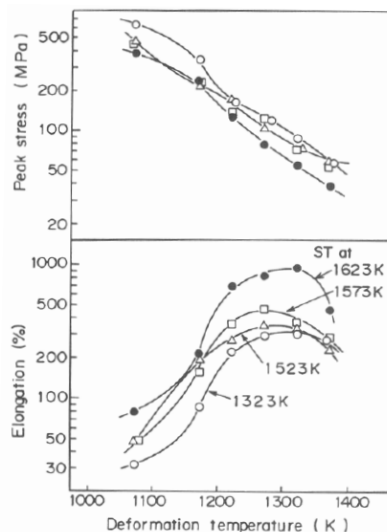
یکی از موارد دیگر که در عملیات ترمومکانیکی فرآیند ابرمومسانی را تحت تاثیر قرار می دهد عملیات نورد است. جهت بررسی این موضوع محققان نمودار توان حساسیت نرخ کرنش  $m$  را بر حسب نرخ کرنش در عملیات ترمومکانیکی مختلف که در آنها کاهش ضخامت در هنگام نورد متفاوت است رسم می کنند. در شکل (۶) مشاهده می شود که با افزایش میزان کاهش در ضخامت از ۵۰٪ به ۹۰٪ در هنگام فرآیند نورد، مقدار  $m$  در هر دو حالت افزایش یافته و به مقدار ۰/۶ می رسد. که این امر نشان دهنده بهبود بیشتر ساختار و افزایش توزیع یکسان ریز دانه ها، در ساختار می باشد. ضمناً همانطور که مشاهده می شود مقادیر  $m$  در تمام منحنی های نمودار ۶ الف که عملیات نورد به تنهایی انجام شده است بیشتر از مقادیر  $m$  در منحنی های نمودار (۶ ب) که در آن عملیات نورد همراه با عملیات انحلالی انجام

$$l-m = (\partial \ln \sigma / \partial \ln \dot{\epsilon})$$

مشاهده می شود با افزایش دمای انحلال از ۱۳۲۳ تا ۱۶۲۳ درجه کلویتن تنش کاهش یافته و افزایش طول بوجود آمده در حین فرآیند ابرمومسانی بیشتر می شود، در نتیجه رفتار سیلان ماده بسیار تحت تاثیر دمای عملیات انحلالی است. زمان عملیات انحلالی نیز مانند دمای آن تاثیر به سزایی بر روی فرآیند ابرمومسانی دارد که محققان جهت بررسی آن، نمودارهایی که در بالا ذکر شد را بر اساس زمان نگهداری در عملیات انحلالی رسم کرده و به بررسی آن می پردازند.



شکل (۳) تصویر شماتیک دو نوع از عملیات ترمومکانیکی که می توان بوسیله آنها به ساختار مناسب جهت فرآیند ابرمومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فازی دست یافت [۱۳].

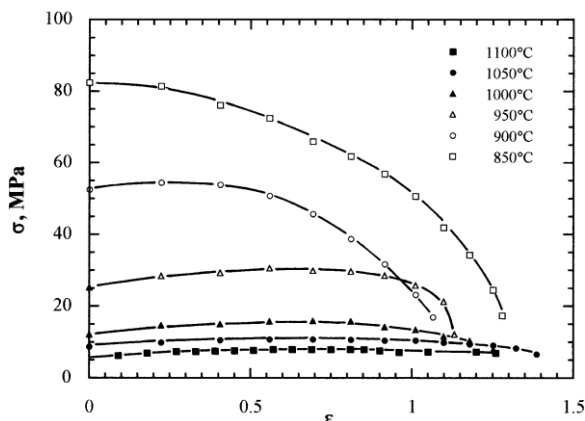


شکل (۴) تغییرات مشخصات کشش با دمای تغییر شکل در نرخ کرنش اولیه  $10^{-3}\text{s}^{-1}$  [۱۰].

در شکل (۵) نمونه ای از این نمودارها رسم شده است و مشاهده می شود که با افزایش زمان نگهداری (بیشتر از ۵

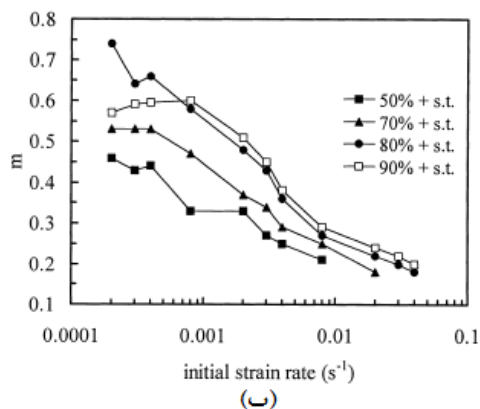
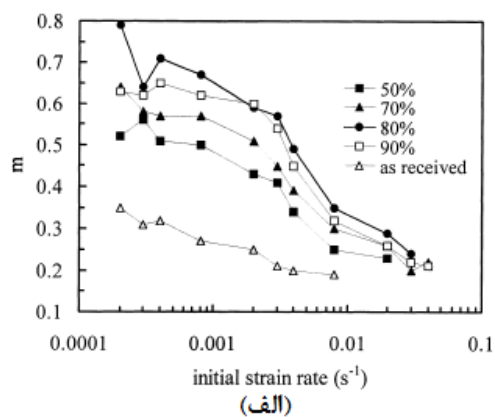
وجود آمده کمتر بوده و کرنش حاصل بیشتر است. در نتیجه جهت دست یافتن به بهترین حالت ابرومسانی، باید به بررسی تاثیرات نرخ کرنش و دما بر روی این فولادها پرداخت و دما و نرخ کرنش بهینه را جهت فولادهای زنگ نزن دو فازی بدست آورد [۴،۱۲].

جهت بررسی اثرات نرخ کرنش و دما بر روی فولادهای زنگ نزن دو فازی بایستی نمونه های با خاصیت ابرومسانی را در دما و نرخ کرنش های متفاوت مورد آزمایش قرار داد (توسط آزمایش کشش تک محوری)، و نمودارهای افزایش طول-نرخ کرنش را در دماهای مختلف رسم کرده و نرخ کرنش و دمای ابرومسانی بهینه را جهت فولادهای زنگ نزن دو فازی بدست آورد. در شکل (۸) نمودار افزایش طول بر حسب نرخ کرنش فولاد زنگ نزن دو فازی در دو دمای مختلف نشان داده شده است، می توان مشاهده کرد که با افزایش نرخ کرنش تا  $5 \times 10^{-2} s^{-1}$  در هر دو دما، می توان به بیشترین افزایش طول به میزان ۸۰٪ دست یافت، اما با افزایش بیشتر نرخ کرنش میزان افزایش طول به شدت کاهش می یابد. علت کاهش افزایش طول با افزایش نرخ کرنش به این دلیل است که، انجام فرآیند ابرومسانی بوسیله سرخوردن مرز دانه ها رخ داده و افزایش زیاد نرخ کرنش زمان لازم را جهت انجام این فرآیند محدود کرده و منجر به وجود آمدن فرآیند خزش نابجایی و گسسته شدن نمونه می شود [۱۴،۵].



شکل (۷) مقایسه منحنی های تنش و کرنش حقیقی در فولاد زنگ نزن دو فازی در دماهای مختلف و نرخ کرنش  $10^{-4} s^{-1}$  [۴].

شده است می باشد، در نتیجه انجام عملیات انحلالی بعد از نورد باعث کاهش مقدار  $m$  و متعاقباً کاهش مقدار افزایش طول بدست آمده در فرآیند ابرومسانی می گردد. زیرا با انجام عملیات حرارتی انرژی فعالسازی لازم جهت انجام تبلور مجدد (که در طول فرآیند ابرومسانی رخ می دهد) کاهش یافته و در نتیجه فرآیند تبلور مجدد بطور کامل رخ نداده و متعاقباً میزان افزایش طول بدست آمده کاهش می یابد [۶].

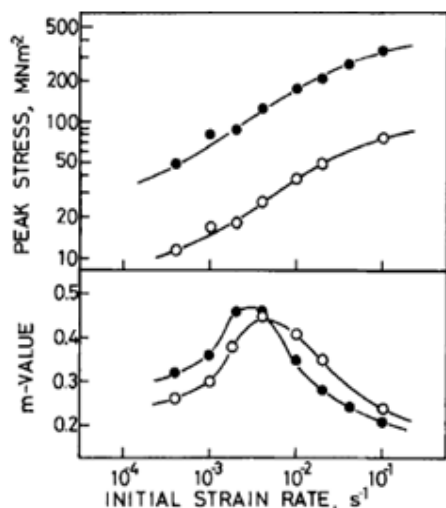


شکل (۶) نمودار حساسیت نرخ کرنش ( $m$ ) به عنوان تابعی از نرخ کرنش برای نمونه های (الف) نورد سرد شده و (ب) نورد سرد و عملیات حرارتی شده در دمای  $1050^\circ C$  [۶].

### ۳- ابرومسانی

در فولادهای زنگ نزن دو فازی نیز مانند سایر مواد ابرومسان در دماهای پایین ( $T < 0.5T_m$ )، این مواد از خود خاصیت ابرومسانی را در محدوده کمی نشان داده و با افزایش دما میزان تغییر شکل همگن بوجود آمده افزایش می یابد. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می شود در نرخ کرنش ثابت با افزایش دما از  $850^\circ C$  با  $1100^\circ C$  میزان تنش

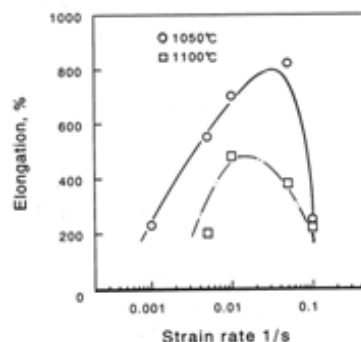
نتیجه انرژی لازم را جهت انجام آن بدست می آورند. انرژی فعالسازی جهت تغییر شکل ابرمومسانی در فولاد زنگ نزن دو فازی عموماً  $306 \text{ kJ mol}^{-1}$  بوده که این مقدار انرژی نزدیک به انرژی نفوذ آهن در فازهای  $\alpha$  و  $\gamma$  که به ترتیب  $251 \text{ kJ mol}^{-1}$  و  $280 \text{ kJ mol}^{-1}$  می باشد است [۴،۵،۱۰].



شکل (۹) تغییرات تنش ماکزیموم و مقادیر m با نرخ کرنش اولیه در نمونه های تغییر شکل یافته در دمای  $1050^\circ\text{C}$  (دایره روشن) و دمای  $900^\circ\text{C}$  (دایره های تیره) [۸].

#### ۴- تغییرات ریزساختار

با انجام عملیات ترمومکانیکی ساختار فولاد زنگ نزن دو فازی به یک ساختار ریز دانه تبدیل می شود. در شکل ۱۰ سه نوع ساختار  $\alpha+\gamma$  که ممکن است بعد از عملیات ترمومکانیکی فولادهای زنگ نزن دو فازی بوجود آید به همراه نمودار زمان-دما-تغییر حالت در تبلور مجدد<sup>۱</sup> نشان داده شده است. در شکل (۱۰) مشاهده می شود که بازیابی نمونه تغییر شکل یافته به سرعت انجام می گیرد. از قسمتهای الف، ب و ج شکل (۱۰) مشاهده می شود که پیرسختی در دماهای پایین باعث رسوب سریعتر فاز  $\gamma$  شده که بدلیل اثر پین کنندگی آنها دانه های  $\alpha$  ریز تر می گردد و هرچه



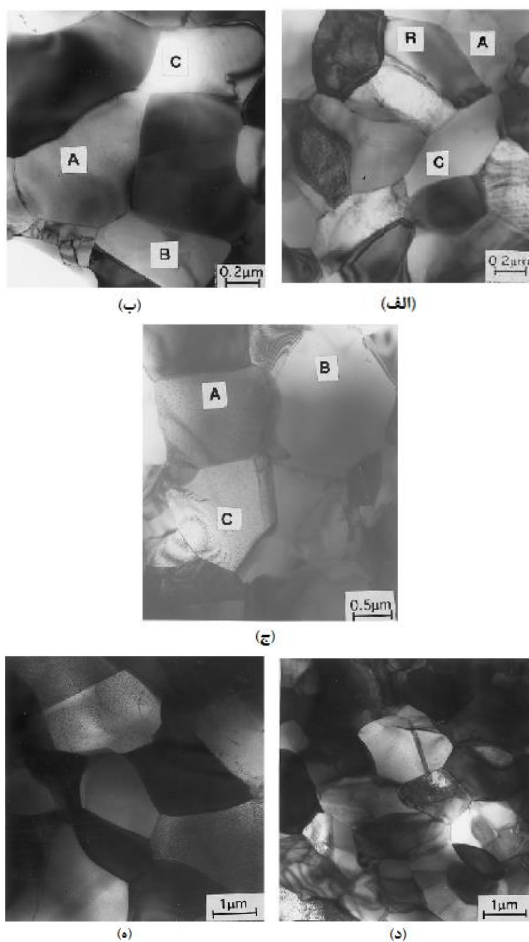
شکل (۸) نمودار افزایش طول-نرخ کرنش در دمای  $1050^\circ\text{C}$  و  $1100^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد [۱۴].

همانطور که می دانیم یکی از ویژگی های مواد ابرمومسانی نشان دادن توان حساسیت نرخ کرنش بزرگتر از  $0.33$  در طول فرآیند کشش می باشد و یکی از نمودارهای مهم که در بررسی این مواد رسم می شود نمودار تنش-نرخ کرنش است که بوسیله اندازه گیری شیب آن می توان مقدار m را بدست آورد، و نمودار m بر حسب نرخ کرنش را رسم کرده و به بررسی تغییرات نرخ کرنش در حین فرآیند ابرمومسانی پرداخت. محققان با انجام آزمایش کشش و تغییر سرعت کرنش در آن، نمودار لگاریتمی تنش-سرعت کرنش را بوسیله کامپیوتر رسم کرده و مقادیر توان حساسیت نرخ کرنش را بدست می آورند. در شکل (۹) نمودار لگاریتمی نرخ کرنش-تنش و نرخ کرنش-توان حساسیت نرخ کرنش نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که نمودار تنش-نرخ کرنش فولادهای زنگ نزن دو فازی نیز مانند دیگر مواد با خاصیت ابرمومسان به شکل S می باشد و می توان آن را به سه منطقه تقسیم کرد. که ناحیه I ناحیه تنش های کم، ناحیه II ناحیه ابرمومسانی، و ناحیه III ناحیه تنش های بالا می باشد. همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است با افزایش نرخ کرنش تا  $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  مقدار m افزایش یافته و به  $0.5$  می رسد و در نتیجه بیشترین مقدار افزایش طول بدست می آید که مطابق با شکل (۶) است [۸-۱۴،۱۰].

محققان انرژی فعالسازی فرآیند ابرمومسانی را به جهت اینکه یک مکانیزم فعال شده حرارتی است را توسط روشهای معمول بدست آورده و با انرژی فعالسازی روشهای مختلف نفوذ در این مواد مورد مقایسه قرار می دهند و در

<sup>۱</sup>- Recrystallization-Precipitation-Temperature-Time

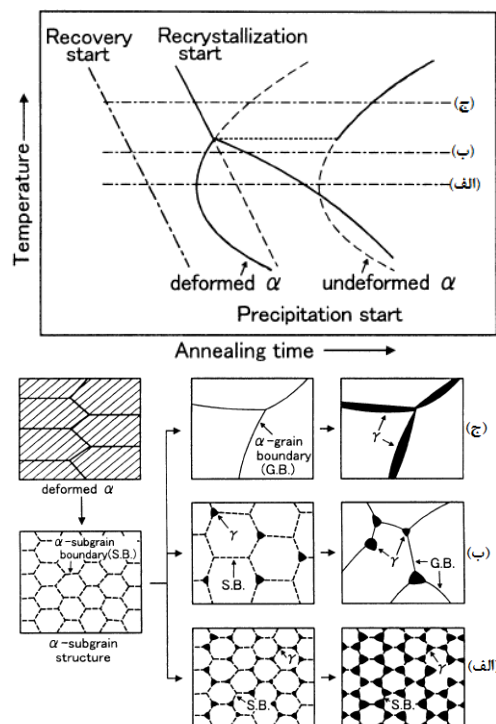
که عدم تطابق دانه های  $\gamma$  بطور پیوسته با افزایش مقدار تغییر شکل افزایش یافته، که به این پدیده تبلور مجدد دینامیکی پیوسته گویند. در تغییر شکل ابرومسان فولادهای زنگ نزن دو فاز، نقش تبلور مجدد دینامیکی ایجاد ساختار دو فاز  $\gamma$  ریز در مراحل اولیه تغییر شکل بوده، که جهت لغزش مرز دانه ها مناسب می باشند. همانطور که مشاهده می شود چگالی نابجایی ها کم و دانه ها بصورت ریز و مشابه تا ۷۵٪ تغییر شکل هنوز باقی مانده اند که نشان می دهد تغییر شکل بوسیله لغزش مرز دانه ها که توسط تبلور مجدد کمک می شود انجام می گیرد [۵،۱۳،۱۵].



شکل (۱۱) ریزساختار فولاد زنگ نزن دو فاز  $(\sigma+\gamma)$  قبل از تغییر شکل. (الف) تصویر TEM ماده قبل از تغییر شکل؛ (ب) تصویر TEM ماده بعد از ۲۰٪ تغییر شکل؛ (ج) تصویر TEM ماده بعد از ۵۰٪ تغییر شکل؛ (د) تصویر TEM ماده بعد از ۲۰۰٪ تغییر شکل؛ (ه) تصویر TEM ماده بعد از ۷۵۰٪ تغییر شکل [۵].

در نتیجه علت تغییر شکل ابرومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فاز  $(\alpha+\gamma)$  ناشی از تعادل بین تبلور مجدد

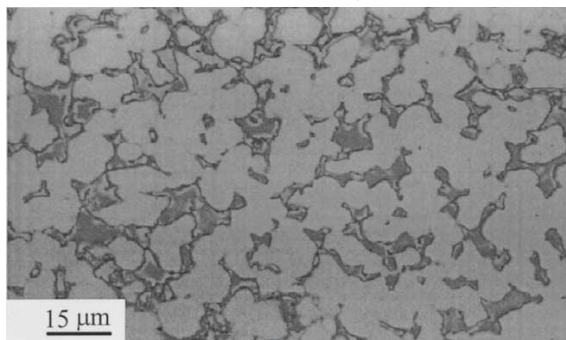
دمای پیر کردن افزایش یابد بدلیل عقب افتادن رسوب فاز  $\gamma$ ، زمان تبلور مجدد دانه های  $\alpha$  بیشتر شده و دانه ها درشت تر می گردند. تغییرات ریز ساختار در فولاد زنگ نزن دو فاز  $(\sigma+\gamma)$  در حین عملیات ترمومکانیکی نیز تقریباً مشابه بالا است. در این ریز ساختار دانه های  $\alpha$  در ابتدای عملیات ترمومکانیکی به ساختار  $\sigma+\gamma$  تبدیل می شود و به دلیل رابطه یکسان تطابق بین فاز  $\gamma$  رسوب کرده و دانه های اولیه  $\alpha$ ، مرزهای  $\gamma/\gamma$  در ساختار دو فاز  $\gamma+\sigma$  به مرزهای با زاویه کم تبدیل می شوند [۵،۱۳،۱۵].



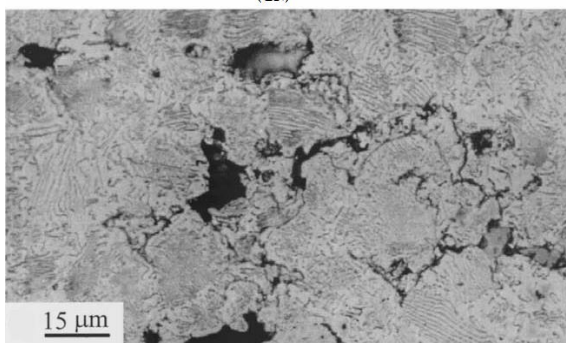
شکل (۱۰) تصویر شماتیک دیاگرام RPTT و فرآیند تشکیل ساختارهای متفاوت  $\alpha+\gamma$  در حین پیر کردن در دماهای مختلف فولاد [۱۳].

بعد از انجام عملیات ترمومکانیکی نمونه ها تحت تغییر شکل ابرومسانی قرار می گیرند. همانطور که ذکر شد قبل از تغییر شکل ابرومسان دانه های  $\alpha$  در ساختار دو فاز  $(\gamma+\alpha)$  و دانه های  $\gamma$  در ساختار دو فاز  $(\sigma+\gamma)$  دارای مرزهای با زاویه کم می باشند که بیشتر محققان بوسیله استفاده از الگوهای کیکوچی این مورد را نشان داده اند. تغییرات ریزساختار در حین فرآیند ابرومسانی در شکل (۱۱) نشان داده شده و به روشنی می توان مشاهده کرد

مناسب است در حالی که در آزمایشهای سریع (کمتر از ۱ ساعت) فاز  $\sigma$  زمان لازم جهت رسوب را دارا نمی باشد [۶].



(الف)



(ب)

شکل (۱۲) ریز ساختار نمونه در نقطه نزدیک به محل شکست که تحت  $۸۰\%$  نورد قبل از کشش قرار گرفته است (الف) آزمایش در نرخ کرنش  $۴ \times 10^{-3} s^{-1}$  (ب) نرخ کرنش  $۳ \times 10^{-4} s^{-1}$  [۶].

در شکل (۱۳) نمودار نرخ کرنش-کسر حجمی حفره ها نشان داده شده است. از شکل فوق می توان مشاهده کرد که کسر حجمی حفره ها با کاهش نرخ کرنش کاهش می یابد. شکل (۱۴) نشان می دهد که توزیع اندازه حفره ها در سطح نمونه ها در نرخ های کرنش متفاوت بصورت یک توزیع گوسی می باشد. با مقایسه توزیع های گوسی در شرایط مختلف به روشنی مشاهده می شود که با کاهش نرخ کرنش، میانگین حفره ها کاهش یافته و در ساختار های همگن توزیع حفره ها باریکتر می باشد [۱۲].

ضمناً در مورد تاثیرات دما محققان نشان دادند که عموماً زمانی که دمای آزمایش بیشتر از  $۹۵۰^{\circ}C$  باشد حفره دار شدن به تاخیر افتاده و نمونه ها دیرتر می شکنند و در نتیجه تغییر شکل همگن تر می شود. متعاقباً حفره دار شدن در آزمایشهای کشش دو محوری نیز قابل مشاهده است که در شکل (۱۵) نمونه ای از آن نشان داده شده است [۱۱].

دینامیکی و کارسختی در مجاورت فاز  $\gamma$  می باشد، ضمناً انحلال اتمهای N به عنوان عنصر پایدار کننده آستنیت می تواند نقش مهمی را در ابر مومسانی، قبل از تغییر شکل و در هنگام تغییر شکل ایفا کند. ضمناً مکانیزم تغییر شکل ابرمومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فازی مانند دیگر مواد ابرمومسان سرخوردن مرز دانه ها می باشد و نقش فاز دوم جلوگیری از رشد دانه های  $\alpha$  است. در محدوده دمایی  $۸۰۰-۱۱۰۰^{\circ}C$  مکانیزم تغییر شکل ابرمومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فازی، بدلیل وجود ذرات ریز نسبتاً سخت پراکنده شده در زمینه سرخوردن مرز دانه ها نبوده و مکانیزم ابرمومسانی، تبلور مجدد دینامیکی فاز نرم تر می باشد. در نتیجه تغییر شکل ابرمومسانی در ساختارهای دو فازی به دلیل سرخوردن مرز دانه ها است و باعث می شود که مرز دانه ها در این مواد به مرزهایی با زاویه زیاد تبدیل گردند [۴، ۱۱، ۱۴، ۱۵].

#### ۵- حفره دار شدن

با وجود کرنش های پلاستیک زیاد که در مواد ابرمومسان بدست می آید، بخوبی ثابت شده است که حفره دار شدن در مواد ابرمومسان نیز اتفاق می افتد. در نتیجه بررسی اثرات نرخ کرنش و دما بر روی حفره دار شدن فولادهای زنگ نزن دو فازی نیز مهم و ضروری می باشد. ضمناً همانگونه که اشاره شد فاز  $\sigma$  نیز باعث بوجود آمدن حفره در ساختار فولادهای زنگ نزن دو فازی می شود. در فولادهای زنگ نزن دو فازی تشکیل فاز  $\sigma$  در هنگام عملیات ترمومکانیکی رابطه مستقیمی با حفره دار شدن این فولادها دارد. شکل (۱۲) ریز ساختار یک نمونه در نزدیکی نقطه شکست را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در نمونه ای که در معرض نرخ کرنش  $۴ \times 10^{-3} s^{-1}$  قرار گرفته است فاز  $\sigma$  مشاهده نشده و مقدار حفره های تشکیل شده بسیار کمتر از نمونه ای می باشد که در معرض نرخ کرنش  $۳ \times 10^{-4} s^{-1}$  قرار گرفته است. در نتیجه به روشنی می توان دریافت، که این امر بدلیل زمان انجام آزمایش است زیرا مدت انجام آزمایش اگر بیشتر از ۱۰ ساعت باشد جهت رسوب فاز  $\sigma$

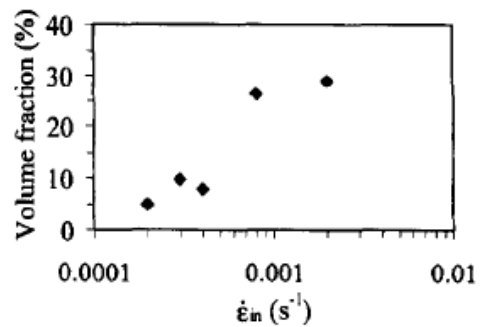


سپس کوئنچ کردن در آب، ب- انجام عملیات نورد سرد با حداکثر ۲۵-۳۵٪ کاهش در ضخامت، ج- آنیل در دمای ۱۰۰۰°C به مدت یک ساعت جهت رسوب فاز FCC در زمینه BCC. که بوسیله آن می توان به دانه هایی با اندازه ۳μm دست یافت.

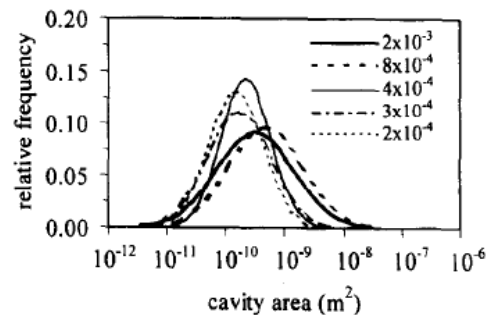
● تقریباً تمام فولادهای زنگ نزن دو فازی که دارای خاصیت ابر مومسانی هستند دارای دانه های ریز مشابه با توزیع هموزن ذرات فاز ثانویه هستند که در طول تغییر شکل ابرمومسان دانه ها رشد می کنند، اما اساساً در ساختار بصورت مشابه باقی می ماند. انرژی فعالسازی جهت تغییر شکل ابرمومسانی در دماهای بالا در فولادهای زنگ نزن دو فازی نزدیک به انرژی نفوذ آهن در فازهای α و γ می باشد ضمناً در دماهای پایین مشابه با انرژی فعالسازی برای نفوذ از طریق مرز دانه های آهن α و آهن γ است.

● جهت تغییر شکل ابرمومسانی فولادهای زنگ نزن دو فازی دما و نرخ کرنش بهینه ای وجود دارد که در آن به بیشترین میزان تغییر شکل به دلیل کاهش حفره های موجود آمده در طول تغییر شکل می توان دست یافت. عملیات ابرمومسانی بهینه بطور مشخص جهت آلیاژهای مختلف در فولادهای زنگ نزن دو فازی متفاوت است ولی بهترین بازه ای که می توان جهت این فرآیند ذکر کرد عبارت است از محدوده دمای ۹۵۰-۱۰۰۰°C و نرخ کرنش  $10^{-3} - 5 \times 10^{-3} s^{-1}$  تغییر  $10 \times 2\%$  که به افزایش طول ۸۰٪ می توان دست یافت. تغییر شکل ابرمومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فازی بطور کامل بوسیله سرخوردن مرز دانه ها رخ نمی دهد و ابر مومسانی این فولادها بوسیله مکانیزم سلسله وار تبلور مجدد رخ می دهد که در آن فاز σ نقش مهمی را در بهبود مقدار ابرمومسانی فولادهای زنگ نزن دو فازی بازی می کند.

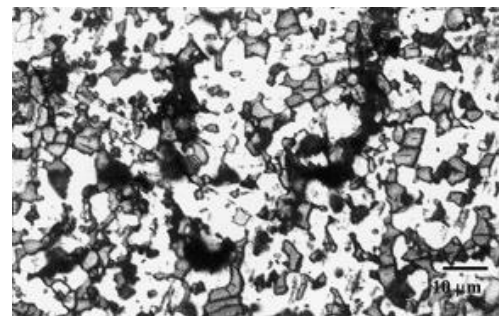
● تغییر ریز ساختار در فولادهای زنگ نزن دو فازی بطور متناوب در طول تغییر شکل ابرمومسانی آنها رخ می دهد. عموماً قبل از تغییر شکل ابرمومسان در فولادهای زنگ نزن دو فازی دانه های α/α و γ/γ دارای مرزهای با زاویه کم می باشند ولی با افزایش تغییر شکل مرزها به مرزهای با زاویه زیاد نسبت به هم تبدیل شده که به این پدیده تبلور مجدد



شکل (۱۳) کسر حجمی حفره ها از سطح مقطع طولی نمونه های شکسته شده، نمونه ها در دمای ۱۲۵۳k تغییر شکل یافته اند [۱۲].



شکل (۱۴) توزیع اندازه حفره ها در دمای ۱۲۵۳K برای نرخ کرنش های مختلف [۱۲].



شکل (۱۵) تصویر میکروسکوپی نشان دهنده حفره ها در ناحیه قله مخروط تغییر شکل یافته فولاد زنگ نزن دو فازی در آزمایش کوژکاری<sup>۱</sup> [۱۱].

## ۶- نتیجه گیری

● یکی از بهترین روشهای ترمومکانیکی که می توان بوسیله آن به ساختار مناسبی جهت ابرمومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فازی دست یافت به قرار ذیل است: الف- انجام عملیات آنیل در دمای ۱۳۰۰°C به مدت یک ساعت و

<sup>۱</sup>Bulging

- [7] Kassner, M.E., *Fundamentals of Creep In Metals And Alloys*, Elsevier, 2009.
- [8] Maehara, Y., Ohmori, Y., *Microstructural Change during Superplastic Deformation of  $\delta$ -Ferrite/Austenite Duplex Stainless Steel*, *Metallurgical Transactions A*, vol. 18A, 1987, pp. 663-672.
- [9] Osada, K., Uekoh, S., Ebato, K., *Superplasticity Of As Rolled Duplex Stainless Steel*, *Transactions ISI J*, vol. 27, 1987, pp. 713-718.
- [10] Maehara, Y., *High Strain Rate Superplasticity Of A 25 Wt Pct Cr-7 Wt Pct Ni-3 Wt Pct Mo-0.14 Wt Pct N Duplex Stainless Steel*, *Metallurgical Transactions A*, vol. 22A, 1991, pp. 1083-1091.
- [11] Patankar, S.N., Lim, C.T., Tan, M.J., *Superplastic Forming Of Duplex Stainless Steel*, *Metallurgical And Materials Transactions A*, vol. 31A, 2000, pp. 2394-2396.
- [12] Pulino-Sagradi, D., Nazar, A.M.M., Ammann, J.J., Medrano, R.E., *Effect of Temperature And Strain Rate On Cavitation In A Superplastic Duplex Stainless Steel*, *Acta Materialia*, vol. 45, No. 11, 1997, pp. 4663-4666.
- [13] Maki, T., Furuhashi, T., Tsuzaki, K., *Microstructure Development By Thermo-mechanical Processing In Duplex Stainless Steel*, *ISI J International*, vol. 41, 2001, pp. 571-579.
- [14] Miyamoto, H., Miamaki, T., Hashimoto, S., *Superplastic Deformation of Micro-Specimens of Duplex Stainless Steel*, *Materials Science and Engineering A*, vol. 319-321, 2001, pp. 779-783.
- [15] Han, Y.S., Hong, S.H., *Phenomena and Mechanism on Super-plasticity of Duplex Stainless Steels*, *Metals And Materials*, vol. 6, No. 2, 2000, pp. 161-167.
- [16] Maehara Y., *Superplastic Deformation of Duplex Stainless Steel*, *United States Patent*, 1987, pp. 4637841.
- دینامیکی پیوسته گویند. ضمناً در طول تغییر شکل ابرمومسانی دانه ها با آهنگ آهسته ای رشد می کنند. با استفاده از عملیات انحلال با دمای بالا و زمان نگهداری کم قبل از تغییر شکل می توان در تغییر شکل های ابرمومسانی زیاد به ساختار نهایی بدون حفره دست یافت. کلاً هر چه کسر حجمی فاز  $\sigma$  افزایش یابد مقدار حفره ها نیز افزایش می یابد. عموماً کسر حجمی حفره ها با کاهش نرخ کرنش کاهش یافته و با افزایش دما حفره ها کمتر و تغییر شکل هموزن تر می شود.
- با استفاده از تغییر شکل ابرمومسانی در فولادهای زنگ نزن دو فازی مشکل شکل پذیری بد این فولادها را در حالت گرم بطور فزاینده ای می توان کاهش داد و ضمناً قیمت زیاد تولید این فولادها با استفاده از فرآیند ابرمومسانی نسبت به شکل پذیری گرم بسیار کاهش می یابد.

## مراجع

- [1] Matsushita, M., Suko, T., Ohfuji, H., Ogiyama, H., *Analysis Of The Texture Of Superplastic Carburized Duplex Stainless Alloy*, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 114, 2009, pp. 522-524.
- [2] Matsushita, M., Ogiyama, H., *Diffusion of Boron on superplastic duplex stainless Steel*, *Journal of Phase Equilibria And Diffusion*, vol. 31, No.1, 2001, pp. 2-5.
- [3] Junior, A.M.J., Reis, G.S., Balancin, O., *Influence of the microstructure on the plastic behavior of duplex stainless steels*, *Materials Science and Engineering A*, In Press, 2010, Accepted Manuscript.
- [4] Jimenez, J.A., Frommeyer, G., Carsi, M., Ruano, O.A., *Superplastic properties of A  $\delta/\gamma$  stainless steel*, *Materials Science And Engineering A*, vol. 307, 2001, pp. 134-142.
- [5] Han, Y.S., Hong, S.H., *Microstructural Changes During Superplastic Deformation Of Fe-24Cr-7Ni-3Mo-0.14N Duplex Stainless Steel*, *Materials Science And Engineering A*, vol. 266, 1998, pp. 276-284.
- [6] Sagradi, M., Sagradi, D.P., Medrano, R.E., *The Effect of The Microstructure on The Superplasticity of A Duplex Stainless Steel*, *Acta Materialia*, vol. 46, No. 11, 1998, pp. 3857-3862.