بررسی چگالی دوقلویی‌های آنیلینگ و نقش مرزهای آنها بر رابطه هال- پچ در آلیاژ 70Cu-30Zn

علی اکبری[1]، مهدیه جمشیدی جم[2]
۱ و ۲- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان
Jamshidijam@iausirjan.ac.ir

چکیده

در این تحقیق اثر اندازه دانه و دمای آنیل روی چگالی دوقلویی‌های آنیلینگ و همچنین تأثیر مرزهای دوقلویی‌های آنیلینگ بر روی خواص مکانیکی برنج ۳۰-۷۰ بررسی شده‌است. به این منظور پس از آلیاژسازی برنج ۳۰-۷۰ و چندین مرحله نوردگرم، ورق‌هایی از آن به میزان ۷۰ درصد کاهش ضخامت تحت نوردسرد قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها در محدوده دمایی ۴۰۰-۹۰۰°C و زمان‌های مختلف در حمام نمک مذاب به‌صورت ایزوترمال آنیل شدند. با اندازه‌گیری اندازه دانه و چگالی دوقلویی‌ها، اندازه دانه مؤثرکه در محاسبه آن مرزدانه و مرز دوقلویی لحاظ شده، به روش تقاطع خطی و با استفاده از تئوری Pande و همکارانش محاسبه گردید. اندازه دانه مؤثر محاسبه شده در رابطه هال- پچ لحاظ گردید و بر اساس آن مقادیر σ_0 و K به ترتیب برابر ۲۲/۸ و ۱۱۸/۵۸ برای رابطه هال- پچ اصلاح شده به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی:

برنج ۳۰-۷۰، چگالی دوقلویی‌های آنیلینگ، اندازه دانه مؤثر، رابطه هال- پچ

۱- مقدمه

دوقلویی‌های آنیلینگ در مواد مختلف از آلیاژهای ساده مثل برنج تا مواد تکنولوژیکی مثل سوپرآلیاژهای پایه نیکل تشکیل می‌شوند [۱]. با وجودیکه اثر دوقلویی‌های آنیلینگ روی خواص مکانیکی مواد بیش از پنجاه سال است که توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده‌است اما بررسی‌های کمّی زیادی در رابطه با نقش مرزهای دوقلویی‌ها روی خواص مکانیکی مواد صورت نگرفته‌است، در حالیکه حضور فصل مشترک‌های هم‌بسته درون مواد پلی‌کریستال از جمله مرزهای دوقلویی آثار زیادی روی خواص فلزات و آلیاژها دارند[۲]. مدل‌های متفاوتی در مورد چگونگی تشکیل دوقلویی‌های آنیلینگ توسط محققان ارائه شده‌است. در مدلی که بیشتر پذیرفته شده‌است فرض می‌شود که مرزهای همبسته دوقلویی روی مرزدانه‌های در حال حرکت، طی فرایند رشد دانه تشکیل می‌شوند. روی مرزدانه‌ها پله‌های {۱۱۱} وجود دارد که در هنگام رشد دانه‌ها و در نتیجه حرکت مرزدانه‌ها، به‌خاطر نقص در چیده شدن اتم‌ها روی این

صفحات، دوقلویی تشکیل می‌شود[۳-۱].

فاکتورهای مهمی میزان دوقلویی‌های آنیلینگ حین رشد را تحت تأثیر قرار می‌دهند که عبارتند از میزان تغییر شکل اولیه قبل از آنیل، دما و زمان آنیلینگ، اندازه دانه، انرژی مرزدانه، سرعت مهاجرت مرزدانه، انرژی مرز دوقلویی (انرژی نقص در چیده شدن)، بافت و ناخالصی‌ها[۳]. سالم و همکارانش در مطالعه رژیم کرنش سختی و توسعه میکروساختار حین تغییر شکل فشاری بالا روی نمونه‌های تیتانیم خالص دریافتند که بعد از کرنش‌های کوچک به محض حضور دوقلویی‌های مکانیکی یک افزایش ناگهانی در سرعت کرنش سختی رخ داده‌است. تطابق این نتایج با رابطه هال- پچ تعیین کرد که مرزهای دوقلوئی اندازه دانه مؤثر را کاهش داده‌اند[۴]. لذا انتظار می‌رود دوقلویی‌های آنیلینگ اثر قابل توجهی روی خواص مکانیکی موادکه رابطه هال- پچ در مورد آنها صدق می‌کند، داشته باشند[۵]. همچنین چگونگی توزیع مرزدانه ها پارامتری است که معرف میکروساختار مواد پلی‌کریستال است. بررسی توزیع مرزدانه‌های مواد دارای ساختارfcc با انرژی نقص در چیده شدن کم که مستعد تشکیل دوقلویی آنیلینگ هستند نشان داده‌است که توزیع خاصی از مرزدانه‌ها دراین مواد ایجاد می‌شود که متأثر از حضوردوقلویی‌ها است[۶]. به‌طوریکه توزیع مرزدانه‌ها تحت تأثیر رابطه جهات دوقلویی و زمینه است[۷].

پاند و همکارانش با آزمایش‌های دقیق و سیستماتیکی اندازه دانه و چگالی دوقلویی‌ها را محاسبه کردند. برای مدل کردن نتایج آزمایش‌های خود فرض کردند که دوقلویی‌ها روی مرزدانه‌ها طی رشدشان جوانه می زنند، تعداد دوقلویی‌ها متناسب با نیروی محرکه مهاجرت و همچنین دامنه مهاجرت مرزدانه‌ها می‌باشد[۲]. آنها نشان دادندکه چگالی دوقلویی‌ها با توجه به اندازه دانه طبق رابطه (۱) قابل محاسبه است و تاکید نمودندکه این رابطه ممکن است اعتبارش در محدوده رشد دانه بعد از تبلور مجدد فلزات fcc باشد[۱].

$$P = \frac{K_t}{D} \cdot Ln\left(\frac{D}{D_0}\right) \qquad (۱)$$

در این رابطه P: چگالی دوقلویی‌های آنیلینگ، K_t: ثابتی که به انرژی نقص در چیده‌شدن بستگی دارد، D: اندازه دانه و D_0:اندازه دانه ای که در آن $P = 0$ است[۳ و ۱].

تعامل بین نابجایی‌های کامل و انواع فصل مشترک توسط محققان بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است. رمی پس از بررسی رابطه لغزش نابجایی‌ها و مرزهای دوقلویی‌ها اظهار داشت که در هر دو نوع دوقلویی‌های آنیلینگ و مکانیکی مرزهای همبسته آنها به‌قدری استحکام دارند که می‌توانند به‌عنوان مانع نابجایی‌ها عمل کنند. نابجایی‌ها می‌توانند از مرزدوقلویی توسط تجزیه شدن عبور کنند اما تجزیه شدن آنها از نظر انرژی نامطلوب است زیرا سی و سه درصد افزایش انرژی رخ می‌دهد و این امر نیاز به اعمال تنشی از سوی نابجایی‌های قفل شده دارد. بنابراین مرزهای دوقلویی به‌عنوان مانعی در مقابل حرکت نابجایی‌ها در نظر گرفته می‌شوند و به احتمال زیاد روی تنش تسلیم مواد اثر دارند[۸].

پس از آنکه هال و پچ برای اولین بار استحکام تسلیم را با معکوس ریشه دوم اندازه دانه در فولاد نرم طبق رابطه (۲) ارتباط دادند، رابطه کلاسیک هال-پچ جهت توصیف اثر اندازه دانه روی تنش تسلیم یک ماده پلی‌کریستال برای چندین دهه همچنان به‌کار می‌رود.

$$\sigma = \sigma_0 + K.D^{\frac{-1}{2}} \qquad (۲)$$

که در این رابطه، σ تنش تسلیم ماده پلی‌کریستال، D متوسط اندازه دانه، σ_0 تنش اصطکاکی و بیانگر مقاومت عمومی شبکه هر کریستال به حرکت نابجایی‌ها، K پارامتر قفل‌کنندگی و بیانگر اثر مرز دانه بر استحکام پلی‌کریستال است[۱۱ و ۹].

در استنتاج رابطه هال - پچ و بیان وابستگی تنش به‌اندازه

دانه، نقش مرزدانه‌ها به‌عنوان مانع نابجایی‌ها توسط مدل‌های متفاوتی توجیه شده‌است. اکثر این مدل‌ها تحت عنوان مدل Pile up شناخته می‌شوند. در این مدل مرزدانه‌ها به‌عنوان مانعی باعث تجمع نابجایی‌ها و در نتیجه تمرکز تنش و فعال شدن نابجای‌ها در دانه مجاور می‌شوند لذا لغزش از یک دانه به دانه دیگر منتقل می‌شود. در مدل دیگر مرزدانه‌ها به‌عنوان مانع نابجایی‌ها موجب محدود کردن مسیر آزاد حرکت نابجایی‌ها و در نتیجه کرنش سختی می‌شوند.

در بررسی تحقیقات در برگیرنده رابطه هال- پچ دیده می‌شود که نقش کلیه فصل مشترک‌ها و عیوب شبکه‌ای از جمله مرزهای همبسته دوقلویی در نظرگرفته نشده‌است. در هر دو نوع مدلی که نقش مرزدانه را در مقابل نابجایی‌ها توجیه می‌کنند مرز دوقلویی نیز می‌تواند همان نقش مرزدانه را داشته باشد لذا باید در محاسبه رابطه هال- پچ لحاظ و رابطه اصلاح شود[۵].

با توجه به تحقیقات گذشته در رابطه با تأثیر قابل توجه مرزهای دوقلویی بر روی خواص مکانیکی مواد و نظریه پاند و همکارانش در مورد چگالی دوقلویی‌ها می‌توان چنین در نظر گرفت که اگر تعداد"n" دانه در خطی با طول معین، L، وجود داشته باشد، G: تعدادمرزدانه های که خط را قطع کرده اند.

$$G = n+1 \approx n \qquad (۳)$$

D: متوسط اندازه دانه، فقط با لحاظ مرزهای دانه

$$D = \frac{L}{n} \qquad (۴)$$

حال اگر همان خط، L، با تعداد M دوقلویی نیز در درون دانه‌ها تقاطع داشته‌باشد، P: چگالی خطی دوقلویی‌ها

$$P = \frac{M}{L} \qquad (۵)$$

N: تعداد دوقلویی در هر دانه با توجه به رابطه (۵)

$$N = \frac{DM}{L} = P.D \qquad (۶)$$

و با توجه به رابطه (۱)

$$N = P.D = K_t.\ln\frac{D}{D_0} \qquad (۷)$$

با لحاظ دو مرز برای هر دوقلویی G': تعداد کل تقاطع مرزهای دانه و مرزهای دوقلویی با خط عبارت است از:

$$G' = n + n2K_t.\ln\frac{D}{D_0} \qquad (۸)$$

لذا با در نظرگرفتن مجموع مرزهای دانه و مرزهای دوقلویی، اندازه دانه مؤثر، D_{eff}، طبق رابطه (۹) به‌دست می‌آید.

$$D_{eff} = \frac{L}{G'} = \frac{D}{(1+2K_t.\ln\frac{D}{D_0})} \qquad (۹)$$

با توجه به درنظرگرفتن نقش مرزهای دوقلویی در کنار مرزهای دانه، به‌عبارت دیگر اندازه دانه مؤثر، رابطه هال-پچ به‌صورت رابطه (۱۰) اصلاح می‌شود و رابطه هال- پچ اصلاح شده نامیده می‌شود[۵ و ۳، ۱].

$$\sigma_{eff} = \sigma_0 + K.D_{eff}^{\frac{-1}{2}} \qquad (۱۰)$$

$$= \sigma_0 + KD^{\frac{-1}{2}}\left[1+2.K_t\ln\left(\frac{D}{D_0}\right)\right]^{\frac{-1}{2}}$$

در این تحقیق تعیین چگالی دوقلویی‌ها در برنج ۳۰-۷۰ در شرایط مختلف آنیلینگ و ارتباط آن با اندازه دانه و دمای آنیلینگ مورد توجه قرارگرفته است. همچنین تأثیر مرزهای دوقلویی روی خواص مکانیکی برنج ۳۰-۷۰ طبق رابطه هال-پچ اصلاح شده بررسی شده‌است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق برنج با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول (۱)، که توسط عملیات آلیاژسازی در کوره مقاومت الکتریکی تحت اتمسفر گاز خنثی تهیّه شده‌است، مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها قبل از بررسی، مراحل متوالی زیر را پشت‌سر گذاشتند:

جدول (۱): ترکیب شیمیایی برحسب درصد وزنی.

Cu	Zn	Fe	Al	Sn
۷۰/۰۷	۲۹/۸۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۲

الف) اسلب اولیه ریختگی با انجام نه مرحله نورد گرم ضخامت آن از ۲۰ میلیمتر به ۲/۵ میلیمتر کاهش یافت

ب) انجام ۷۰ درصد کاهش سطح مقطع با چندین مرحله نورد سرد متوالی

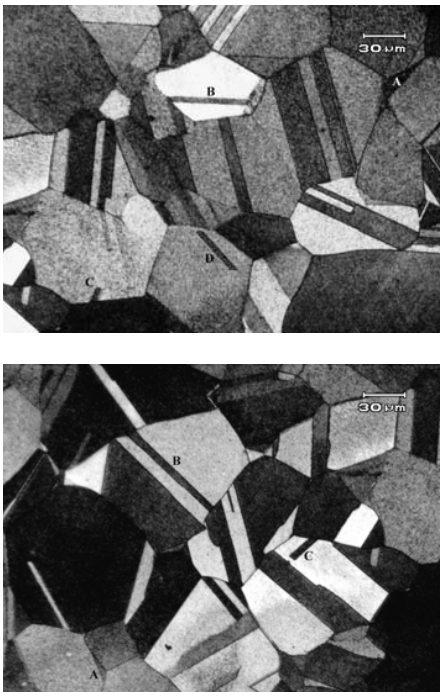
ج) نمونه‌هایی به ابعاد ۱۲×۱۰×۰/۷۵ میلیمتر از ورق نهایی تهیّه شده و در حمام نمک در دماهای۴۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد و زمان‌های مختلف به‌صورت ایزوترمال آنیل و سپس در آب بعد از عملیات حرارتی، یک طرف سطح نمونه‌ها به اندازه $\frac{۱}{۳}$ضخامت به‌دقت سنباده‌زنی و سپس الکتروپالیش و الکترواچ شدند.

ریزساختار نمونه‌ها توسط متالوگرافی نوری مطالعه گردید و اندازه دانه نمونه‌ها و همچنین چگالی دوقلویی‌ها با استفاده از روش تقاطع خطی محاسبه گردید. سختی نمونه‌ها نیز توسط سختی سنجی برینل با بار ۱۰ کیلوگرم اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

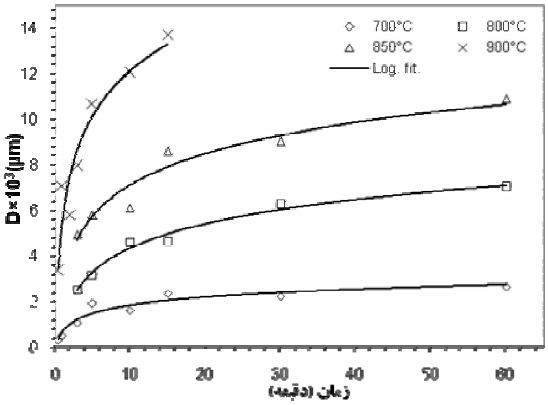
شکل (۱) نمونه‌هایی از ریزساختار این آلیاژ را در دماها و زمان‌های مختلف آنیل با استفاده از میکروسکوپ نوری، نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود ریز ساختار شامل دانه‌های هم‌محور α است که دوقلویی‌های آنیلینگ در ابعاد و مورفولوژی‌های متفاوت به‌وضوح در آن‌ها مشاهده می‌شوند .

چهار مورفولوژی متفاوت دوقلویی‌های آنیلینگ[۳] در شکل (۱) با حروف A-D نمایش داده شده‌اند، A : دوقلویی گوشه‌ای،: دوقلویی که دوطرف دانه را به‌هم متصل می‌کند،



شکل (۱): ریزساختار نمونه آنیل شده در دمای ۷۰۰ ℃ به‌مدت سه دقیقه.

C: دوقلویی که درون دانه خاتمه یافته است و D: دوقلویی که درون دانه قرار دارد و به مرزدانه کج شده است. بطور کلی می‌توان گفت که دوقلویی‌های آنیلینگ طی هر مرحله از انتقال پله‌های $\{۱۱۱\}$ در طول مرزدانه‌های در حال رشد می‌توانند تشکیل شوند[۳ و ۱]. لذا یک پله منفرد می‌تواند دوقلویی‌های آنیلینگ را در جاهای مختلف روی مرزدانه ها و با ضخامت‌های متفاوت و همچنین دوقلویی‌هایی پراکنده و درون زمینه ایجاد کند.شکل (۲) رابطه اندازه دانه با دما و زمان آنیل را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش دما و زمان آنیل، اندازه دانه افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که در زمان‌های اولیه، نرخ رشد سریع است و با افزایش زمان کاهش می‌یابد. این مساله ناشی ازکاهش نیروی محرکه رشد دانه بخاطر کاهش سطح مرزدانه‌ها در واحد حجم است[۱۲].



شکل(۲): تغییرات اندازه دانه برحسب زمان در دماهای مختلف.

در شکل (۳) تـأثیر حضور دوقلویی‌ها روی حرکت مرزدانه‌ها دیده می‌شود. همانطورکه در این شکل مشاهده می‌شود، وجود دوقلویی متصل به مرزدانه باعث انحنایی در مرزدانه می‌شود که این انحناء، دارای تقعر به طرف دانه حاوی دوقلویی است که در نتیجه آن مرزدانه به طرف دانه حاوی دوقلویی حرکت می‌کند.

از نظر ترمودینامیکی می‌توان گفت وجود دوقلویی در یک دانه باعث افزایش انرژی آزاد آن می‌شود لذا ناپایدارتر می‌گردد و در اثر آنیلینگ این دانه کوچکتر و در نتیجه آن حرکت مرزدانه جهت‌دار می‌شود. با توجه به این مساله می‌توان گفت در فرایند رشد دانه علاوه بر انحناء مرزدانه[۱۳]، وجود دوقلویی‌ها نیز در جهت حرکت مرزها نقش دارند. لذا دوقلویی‌ها می‌تواند توزیع نهایی مرزدانه‌ها و درنتیجه خواص حاصل از ساختار را تحت تأثیر قرار دهند. اخیراً گرتسمن و همکارانش نتیجه گرفتند که توزیع مرزدانه‌ها فقط می‌تواند به‌خاطر دوقلویی‌های آنیلینگ متعددی باشد که در ساختار حضور دارند[۱۴]. برای بررسی اثر دما روی چگالی دوقلویی‌ها، اندازه دانه تقریباً معینی در حدود ۳۰۰ µm در نظر گرفته شد و نمونه‌ها در دماها و زمان‌های مختلف جهت حصول این اندازه دانه آنیل شدند.

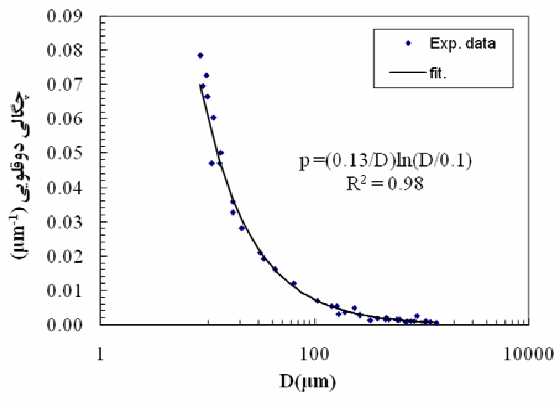
الف

ب

شکل(۳): تأثیر وجود دوقلوهای آنیلینگ روی حرکت مرزدانه‌ها در نمونه آنیل شده
الف: دمای°C ۸۰۰ و ۵ دقیقه
ب: دمای°C ۸۵۰ و ۶۰ دقیقه .

نتایج نشان داد که چگالی دوقلویی‌ها در دماهای مختلف تقریباً مقدار معینی است. به‌عبارت دیگر صرف نظر از اینکه با چه تلفیقی از دما و زمان، اندازه دانه حاصل شده‌است، چگالی دوقلویی فقط وابسته به اندازه دانه است. البته این بدان معنا نیست که دما اثری روی چگالی ندارد بلکه تأثیر دما در وابستگی اندازه دانه به دما حضور می‌یابد[۱]. این نتایج با پیش‌بینی گلیتر[۱۵] که چگالی دوقلویی را تابعی از اندازه دانه و دما می‌داند مغایر است ولی با نتایج پاند و همکارانش[۳ و ۱] توافق دارد.

در راستای بررسی تغییرات چگالی دوقلویی‌ها با اندازه دانه در شکل (۴) دیده می‌شود که صرف نظر از اینکه اندازه دانه با چه تلفیقی از زمان و دمای آنیل به‌دست آمده، با افزایش اندازه دانه، چگالی دوقلویی‌ها به‌صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.

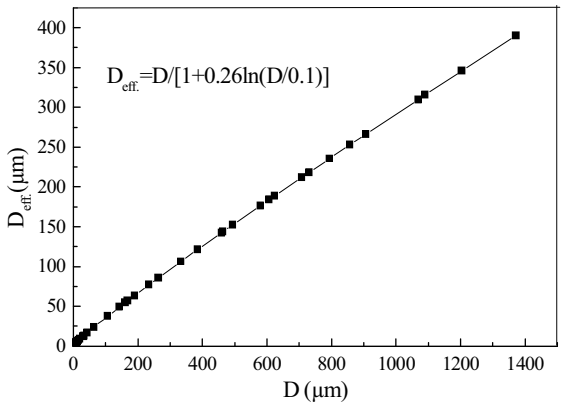


شکل (۴): تغییر چگالی دوقلویی‌های آنیلینگ برحسب اندازه دانه.

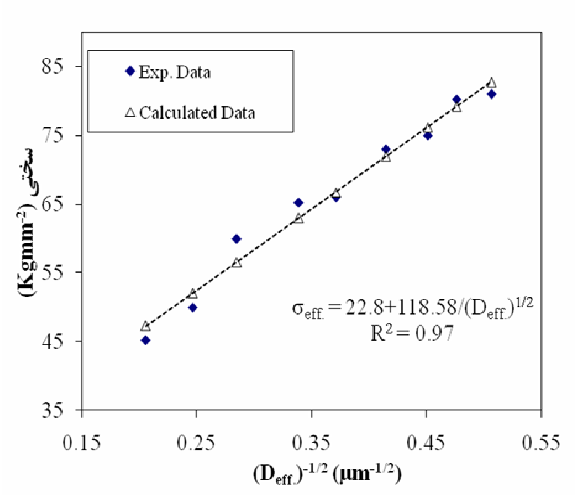
با افزایش اندازه دانه چون دامنه مهاجرت مرزها بیشتر می‌شود احتمال اینکه پله $\{111\}$ بتواند به‌عنوان مولد پاره‌های شاکلی عمل کند افزایش می‌یابد. از طرفی هرچه شعاع انحناء مرز کمتر باشد تعداد پله‌های موجود روی مرزدانه بیشتر خواهدبود[۳]. بنابراین با افزایش اندازه دانه و کاهش شعاع انحناء مرزدانه، نیروی محرکه[۱۶] و همچنین میزان پله‌ها روی مرزدانه کم شده، در نتیجه چگالی دوقلویی کاهش می‌یابد. در این شکل همچنین چگالی به‌دست آمده از رابطه (۱) بر روی نتایج تجربی انطباق داده شد که ضرایب K_t و D_0 به ترتیب برابر ۰/۱۳ و ۰/۱ به‌دست آمد.

با توجه به محاسبه ضرایب K_t، D_0 و با در دست داشتن اندازه دانه و استفاده از رابطه (۹) می‌توان اندازه دانه مؤثر را که در محاسبه آن مرزهای دوقلویی‌ها در کنار مرزهای دانه لحاظ شده‌اند را محاسبه کرد. این اندازه دانه مؤثر به‌صورت تابعی از اندازه دانه در شکل (۵) نشان داده شده‌است.

این اندازه دانه مؤثر می‌تواند مطابق با رابطه (۱۰) در رابطه هال- پچ جایگزین شود زیرا مرزهای دوقلویی به‌عنوان مانعی در مقابل حرکت نابجایی‌ها در نظر گرفته می‌شوند و به احتمال زیاد روی تنش تسلیم مواد اثر دارند. همچنین هر نوع مدلی که نقش



شکل (۵): تغییرات اندازه دانه مؤثر برحسب از اندازه دانه.



شکل (۶): تغییرات سختی برحسب معکوس ریشه دوم اندازه دانه مؤثر.

مرزدانه را در مقابل نابجایی‌ها توجیه می‌کند مرز دوقلویی نیز می‌تواند همان نقش مرزدانه را داشته‌باشد[۸]. شکل (۶) تغییرات سختی را برحسب اندازه دانه مؤثر را طبق رابطه هال-پچ اصلاح شده که مرزهای دوقلویی در احتساب اندازه دانه لحاظ شده‌اند را نشان می‌دهد. در این شکل سختی به‌دست آمده از رابطه (۲) بر روی نتایج تجربی انطباق داده‌شد که مقادیر σ_0 و K به‌ترتیب برابر ۲۲/۸ و ۱۱۸/۵۸ به‌دست آمد. با وجودیکه رابطه هال-پچ بطور گسترده‌ای قابل قبول است و در بسیاری از حالات

رابطه خوبی بین σ و $D^{\frac{-1}{2}}$ وجود دارد اما بدوین نشان داده‌است که معمولا انحرافاتی از این حالت وجود دارد[۱۷]. بایاک و رینز در بررسی ارتباط سختی با معکوس اندازه دانه در برنج فشنگ اظهارکرده بودندکه انحراف از حالت معمول رابطه سختی و اندازه دانه احتمالا به خاطر حضور مرزهای دوقلویی‌ها می‌باشد[۱۸]. لذا با توجه به در نظر گرفته شدن نقش مرز دوقلویی در استحکام ماده، به نظر می‌رسد نتایج به‌دست آمده در این تحقیق بایستی دقیق‌تر باشند که البته نیاز به بررسی بیشتر دارد.

٤- نتیجه گیری

چگالی دوقلویی‌ها در برنج ۳۰-۷۰ با استفاده از روش تقاطع خطی و تئوری پاند و همکارانش محاسبه و با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد چگالی دوقلویی‌ها مستقل از دمای آنیل و فقط تابعی از اندازه دانه است بطوریکه با افزایش اندازه دانه، چگالی دوقلویی‌ها کاهش می‌یابد. با لحاظ مرزهای دوقلویی در کنار مرزهای دانه، اندازه دانه مؤثر با توجه به چگالی دوقلویی‌ها محاسبه و در رابطه هال- پچ به‌جای اندازه دانه به‌کار گرفته شد. ثوابت σ_0و K در رابطه هال- پچ اصلاح شده به‌ترتیب برابر ۲۲/۸ و ۱۱۸/۵۸ به‌دست آمد که با توجه به نقش مهّم مرزهای دوقلویی روی خواص مکانیکی احتمالاً مقادیر دقیق‌تری هستند.

٥- مراجع

[1] C. S. Pande, M. A. Imam and B. B. Rath, "study of annealing twinning in Fcc metals and alloys", Met. Trans. A, 21, 2891-96, 1990.

[2] B. B. Rath, M. A. Imam and C. S. Pande, "Nucleation and growth of twin interfaces in Fcc metals and alloys", Mater. Phys. Mech. 1, 61-66, 2000.

[3] S. Mahajan, C. S. Pande, M. A. Imam and B. B. Rath, "Formation of annealing twins in f.c.c. crystals", Acta mater. 45, 2633-2638, 1997.

[4] A. A. Salem, S. R. Kalidindi and R. D. Doherty, "Strain hardening regimes and microstructure evolution during large strain compression of high purity titanium", Scripta Mater. 46, 419-423, 2002.

[5] C. S. Pande, B. B. Rath and M. A. Imam, "Effect of annealing twins on Hall-Petch relation in polycrystalline materials", Mat. Sci. Eng. A, 367, 171-175, 2004.

[6] V. Y. Gertsman, K. Tangri and R. Z. Valiev, "On the grain boundary statistics in metals and alloys susceptible to annealing twinning", Acta Met. et Mat, 42, 1785-1804, 1994.

[7] O. V. Mishin, "Statistical characteristics of grain boundary ensembles in variously textured copper", J. Mat. Sci, 33, 5137-5143, 1998.

[8] L. Remy, "The interaction between slip and twinning systems and the influence of twinning on the mechanical behavior of fcc. Metals and alloys", Met. Trans, 12A, 387-392, 1981.

[9] Dieter. G. E. , " Mechanical Metallurgy", McGraw-hill, USA, 1986.

[10] Meric. C., Atik. E. and Engez. T.,"Experimental microhardness for AA1030, cu, CuZn30, Cusn7, and 6114alloys and correlation with the Hall-Petch relation, Material, Research Bulletin, 34, 12/13, 2043-2052, 1999.

[11] G. Saada," Hall-Petch revisited "Material science and engineering A, 400-401, 146-149, 2005.

[12] F. J. Gil and J. A. Planell, "Behaviour of normal grain growth kinetics in single phase titanium and titanium alloys", Mat. Sci. and eng. A, 283, 2000, 17-24.

[13] J. E. Burke, D. Turnbull, "Recrystallization and grain growth", Prog. in Met. Phys., 3, 220-292, 1952.

[14] V. Y. Gertsman and C. H. Henager, "Grain boundary junctions in microstructure generated by multiple twinning", Interface Science, 11, 403-415, 2003.

[15] H. Gliter, "The formation of annealing twins", Acta Metall, 17, 1421-28, 1969.

[16] F. J. Gil and J. A. Planell, "Behaviour of normal grain growth kinetics in single phase titanium and titanium alloys", Mat. Sci. and eng. A, 283, 17-24, 2000.

[17] Reed-Hill. R. E, Abbaschian. R, Physical Metallurgy Principle, 3rd edition, PWS publishing Co, Boston, 1991.

[18] C. S. Pande, M. A. Imam and B. B. Rath, Proceeding of an International Symposium on interface migratin and control of microstructure, Detroit, Michigan, ASM