



ارائه ی مدلی جدید برای اصلاح تغییرات ضریب نفوذ در حین آسیاکاری سطحی مکانیکی

پویا ولی زاده^۱، شبنم پورنظری^۲، میثم شیخ امیری^۳ و جلیل وحدتی خاکی^۴

چکیده

در این تحقیق به ارائه ی مدلی نوین جهت اصلاح تغییرات ضریب نفوذ در حین آسیاکاری سطحی فلزات، پرداخته شده است. در این مدل تاثیر تولید غیر تعادلی نابجایی ها در اثر آسیاکاری، به عنوان پارامتر تشدید کننده نفوذ پذیری، بر روی ضریب نفوذ مورد مدل سازی قرار گرفته است.

در این مدل ابتدا با استفاده از فرو رونده ی ویکرز، سختی لایه های سطحی تحت آسیاکاری، اندازه گیری شده و با استفاده از یکسری روابط ریاضی استحکام ماده ی مورد بررسی تخمین زده شد. با استفاده از استحکام به دست آمده، دانسیته ی نابجایی ها محاسبه و با استفاده از یکسری روابط کنتیکی، نفوذ پذیری اصلاح شده، محاسبه گردید. در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ به منظور اصلاح ضریب نفوذ و نیز تعیین تغییرات نفوذ پذیری و مطالعه ی آن در حین آسیاکاری استفاده گردید.

تعمیم پذیری و سادگی مدل ارائه شده برای تمام مواد تحت آسیاکاری سطحی، از خصوصیات منحصر به فرد مدل ارائه شده می باشد که آن را از مدل های مشابه متمایز می سازد. □

واژه های کلیدی: ضریب نفوذ، آسیاکاری، انرژی اکتیواسیون فرایند، نابجایی، پدیده های کنتیکی

مقدمه

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

^۴ عضو هیأت علمی گروه مهندسی مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

همانگونه که می دانیم تغییر فرم شدید پلاستیک در حین فرایند آسیاکاری معمولاً با تولید غیر تعادلی جاهای خالی و نابجایی ها و در نتیجه ی آن افزایش انرژی داخلی شبکه و نیز ریز دانه شدن همراه است. این عوامل همگی نقش بسیار تعیین کننده ای در نفوذ و تشدید این فرایند ایفا می کنند [1].

با توجه به ناقص بودن اطلاعات راجع به پدیده های کنتیکی در حین فرایند آسیاکاری و اینکه هنوز عده ای از محققین نقش نفوذ در فرایند آسیاکاری را نفی کرده و تشکیل فاز های نیمه پایدار را به اختلاط اتم ها در نتیجه ی نیزه های برشی در حین فرایند نسبت می دهند [2] و از طرفی مشاهده ی یکسری از فرایندها در حین آسیاکاری که نتیجه ی مستقیم نفوذ می باشند (که در مقایسه با نفوذ حرارتی در دماهایی پایین تر رخ می دهند) از جمله رسوب سختی مکانوشیمیایی [3] و نیز پوشش دهی مکانیکی [4]، اهمیت بررسی پدیده ی نفوذ در حین آسیاکاری را برای ما روشن تر می سازد.

لو و همکارانش [5] با مطالعه ی انرژی فعال سازی در حین نفوذ، که ناشی از دو پارامتر انرژی تشکیل رسوب و انرژی مهاجرت اتم ها می باشد بر این باورند که آسیاکاری مکانیکی انرژی اکتیواسیون لازم برای تولید محصولات را با تولید غیر تعادلی عیوب کاهش داده و به این ترتیب شرایط لازم برای انجام واکنش های حالت جامد در دمایی پایین تر را فراهم کرده و منجر به افزایش نفوذپذیری می گردد. به عبارتی دیگر کاهش انرژی فعال سازی (با توجه به رابطه ی 1) در حین آسیاکاری می تواند کاهش دما را جبران نموده و به این ترتیب نفوذ در حین فرایند آسیاکاری را امری شدنی اتلاق می کنند.

خینا [2] نیزه بررسی نفوذ و مکانیزم های آن در حین آسیاکاری پرداخته است. او معتقد است که تغییر فرم شدید پلاستیک ناشی از آسیاکاری منجر به صعود نابجایی ها می گردد که عاملی برای تولید غیر تعادلی جاهای خالی می باشد. یکی از دلایل اصلی کاهش انرژی اکتیواسیون و افزایش نفوذ پذیری در حین تغییر فرم پلاستیک شدید ناشی از آسیاکاری، تولید نابجایی ها می باشد. بنابر این با محاسبه ی دانسیته ی نابجایی ها در آسیاکاری می توان به بررسی ضریب نفوذ در حین آسیاکاری پرداخت.

باهتاچاریا [6] با استفاده از آنالیز تغییر فرم تحت کرنش شدید (روش کارول هالت)، به محاسبه ی دانسیته ی نابجایی ها و سپس اصلاح ضریب نفوذ پرداخته است. اما وجود شرایط سخت آزمایشگاهی و عدم وجود یک مدل جامع و قابل انطباق برای مواد مختلف و نیز آزمایشات پیچیده، عملی کردن این مدل ها و بررسی آنها را مشکل می سازد. در مدل ارائه شده در این تحقیق سعی شده با استفاده از پایه ای متالورژیکی با تخمین تغییرات مقدار دانسیته ی نابجایی ها با استفاده از روش فرو رونده ی ویکرز، در حین آسیاکاری تأثیر تجمع نابجایی هایی که در نتیجه تغییر شکل پلاستیکی شدید به وجود آمده و باعث افزایش ضریب نفوذ به علت تحرک بیشتر در هسته نابجایی ها می شوند، محاسبه گردد.

تعمیم پذیری و سادگی مدل ارائه شده برای تمام مواد تحت آسیاکاری سطحی از خصوصیات منحصر به فرد مدل ارائه شده می باشد که آن را از مدل های مشابه متمایز می گرداند.

در این مقاله اثر تولید نابجایی ها در اثر آسیاکاری بر روی ضریب نفوذ مورد مدل سازی قرار گرفته است.

توسعه مدل

در حین آسیاکاری سطحی مواد، در اثر برخورد گلوله ها با سطح، سطح مورد نظر تحت تغییر فرم شدید پلاستیک واقع شده که منجر به افزایش دانسیته ی عیوب می گردد. با افزایش دانسیته ی عیوب، انرژی داخلی شبکه افزایش و در نتیجه انرژی

فعال سازی جهت نفوذ کاهش می یابد. کاهش انرژی اکتیواسیون فرایند نفوذ منجر به افزایش نفوذ پذیری (ضریب نفوذ) طبق رابطه ی (1) می گردد.

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

که در رابطه ی 1 ضریب نفوذ، Q انرژی فعال سازی جهت نفوذ و T دمای انجام فرایند می باشد. یکی از این عیوب که در این مدل به بررسی اثر آن پرداخته شده است نابجایی ها می باشد که مانند لوله های عمل نموده و اجازه می دهند تا اتم ها در امتداد آنها نفوذ کنند و به این شکل نفوذ پذیری را افزایش می دهند. این افزایش به شدت وابسته به دانسیته ی نابجایی ها می باشد.

هدف از مدل ارائه شده در این تحقیق مطالعه ی تغییرات ضریب نفوذ در حین آسیاکاری و بررسی آن با آزمایشات ساده ی طراحی شده می باشد که از مزیت های اصلی این مدل می باشد.

در این مدل سازی با یکتواخت فرض کردن توزیع انرژی ناشی از آسیاکاری در تمام نقاط هر لایه از نمونه ی مورد بررسی (که با انتخاب مناسب توزیعی متفاوت از گلوله ها و نیز نوع دستگاه آسیاکاری، فرضی صحیح می باشد [4])، همان گونه که در قسمت بعدی اشاره شده است، به تخمین مقدار دانسیته ی نابجایی ها در هر لایه و سپس اصلاح ضریب نفوذ پرداخته شده است.

از مقایسه ی منحنی تنش کرنش فلزات با عدد سختی ویکرز با فرورونده ی هر می، که در نتیجه ی اثرگذاری فرورونده ی آن تحت کارسختی قرار می گیرند، در می یابیم که تغییر فرم تولید شده توسط فرورونده در ارتباط با کرنشی حدود 8 الی 10 درصد می باشد [7]. بنابراین می توان با یک تقریب صحیح عدد گزارش شده از آزمایش سختی سنجی ویکرز را به استحکام فلز نسبت داد. که در رابطه ی 2 به این نسبت اشاره شده است [7].

$$cHv = P \quad (2)$$

که در رابطه ی فوق Hv عدد سختی سنجی ویکرز توسط فرورونده ی هر می، P استحکام معادل در کرنشی حدود 10-8% بر حسب MPa و c عدد ثابتی است که برای آلومینیوم 2024 تحت عملیات حرارتی رسوب سخت شده که در این بخش مورد استفاده قرار گرفته است، چیزی حدود 3/2 گزارش شده است [7].

با استفاده از رابطه ی 3 مقدار ρ ، (دانسیته ی نابجایی ها) تخمین زده می شود.

$$P = P_0 + M\alpha G b \rho^{0/5} \quad (3)$$

که در رابطه ی فوق M ضریب تیلور و مقدار آن 3/06، α عددی بدون بعد و برابر 0/5، G مدول برشی و برابر 28 GPa، b طول بردار برگرز و مقدار آن 0/2864 nm و P_0 استحکام تسلیم که برابر 324 MPa می باشد.

در قدم بعدی با استفاده از رابطه ی 4 D_{eff} که ضریب نفوذ اصلاح شده در حین آسیاکاری می باشد، محاسبه می گردد

$$D_{eff} = D_{0L} \exp(-Q_L/RT) + A_0 c \rho D_{0C} \exp(-Q_C/RT) \quad (4)$$

که در رابطه ی فوق D_{0L} ضریب نفوذ شبکه و مقدار آن برابر $1/5 \times 10^5$ ، D_{0C} ضریب نفوذ در هسته ی نابجایی در مساحت موثر که برابر 7×10^{-25} ، b طول بردار برگرز برابر $2/864 \times 10^{-10}$ ، انرژی فعال سازی شبکه و مقدار آن $1/26 \times 10^5$ ، Q_C انرژی فعال سازی هسته ی نابجایی که مقدار آن 81/46، R ثابت جهانی گازها و برابر 8/314 و T دمای فرایند که مقدار آن 50 درجه ی سانتی گراد می باشد [6]. لازم به ذکر است که مقادیر مورد استفاده در رابطه ی 3 و 4 برای مواد مختلف متفاوت می باشد و ارقام ارائه شده صرفاً برای سیستم Al-Cu صحیح است [10].

D_{eff} حاصل از معادله ی فوق مقدار ضریب نفوذ اصلاح شده در اثر تغییر دانسیته ی نابعجایی ها می باشد. که با استفاده از آن می توان به بررسی تغییر فرم و نیز بررسی چگونگی تغییرات ضریب نفوذ در حین آسیاکاری پرداخت و از طرفی میزان کرنش اعمالی در این فرایند را تخمین زد. به این ترتیب، با استفاده از مدل ارائه شده می توان، از نتایج سختی سنجی و مطابق الگوریتم زیر اصلاحی مناسب از ضریب نفوذ در آسیاکاری صورت بگیرد.

1. ابتدا میکرو سختی سنجی در لایه های مختلف صورت بگیرد
2. نتایج حاصل از مرحله ی 1 را در رابطه ی 2 قرار داده و استحکام ماده ی مورد بررسی تخمین زده شود.
3. نتایج حاصل از مرحله ی 2 را در رابطه ی 3 قرار داده و مقدار دانسیته ی نابعجایی ها تخمین زده شود.
4. مقادیر به دست آمده از مرحله ی 3 را در رابطه ی 4 قرار داده و مقادیر ضریب نفوذ اصلاح شده در هر لایه محاسبه گردد.

مواد و روش تحقیق

از مدل فوق برای تصحیح ضریب نفوذ و تعیین تغییرات آن در حین پروسه ی آسیاکاری استفاده شده است. به این منظور تغییرات سختی نمونه های آسیاکاری شده در زمان های مختلف اندازه گیری شده و با استفاده از مدل ارائه شده ضریب نفوذ اصلاحی بیان شده است.

در این راستا قطعات آلومینیوم کار شده ی 2024 به صورت دیسک هایی به قطر 14 mm و ضخامت 5 mm برش زده شدند. در این پروژه به دو دلیل اصلی از نمونه های رسوب سخت شده ی 2024 استفاده گردید، اولاً فرایند رسوب سختی مکانوشیمیایی در این نمونه ها صورت گرفته و تشکیل رسوبات اثبات گردیده بنابراین می توان انتظار داشت که نفوذ حتما در حین این پروسه اتفاق می افتد و ثانیاً وجود رسوبات تشکیل شده در حین فرایند می توانند به عنوان عواملی موثر جهت تشدید اثر نابعجایی ها عمل نمایند. به همین دلیل نمونه ها جهت انجام فرایند رسوب سختی مکانوشیمیایی به مدت 90 دقیقه در دمای 495°C تحت عملیات همگن سازی واقع شده و در نهایت در مخلوط آب و یخ کونچ شده و بلافاصله در داخل ظرف های آسیاکاری جا سازی شدند.

سپس در دستگاه آسیاکاری، نمونه ها برای مدت زمان های 12 و 6، 9، 3، 1 ساعت با سرعت 200 rpm تحت عملیات آسیاکاری واقع شدند.

پس از خروج، نمونه ها در راستای ارتفاعشان برش زده شدند و برای بررسی تغییرات میکرو سختی در عمق، عملیات مانیت گیری انجام پذیرفت.

نتایج میکرو سختی سنجی در جدول 1 آمده است.

جدول 1 نتايج حاصل از سختی سنجی ويکرز با فروروندهی هرمی تحت بار 50 گرمی در فواصل مختلف از سطح آسیاکاری شده در زمان های متفاوت آسیاکاری.

Distances from milled surface (µm)									opposing surface
	30	60	120	190	250	320	500	750	
Milling duration (hr)									
1	155.70	155.70	155.70	123.47	141.44	142.56	143.68	123.4	142
3	183.11	167.85	167.85	167.85	166.43	166.43	161	127.16	142
6	166.43	166.43	166.43	154.43	137.13	137.13	134	137.13	142
9	183.11	183.11	160.93	154.4	148.42	148.32	142.56	154.43	142
12	183.11	183.11	167.85	167.85	148.32	147.1	148.32	148.32	142

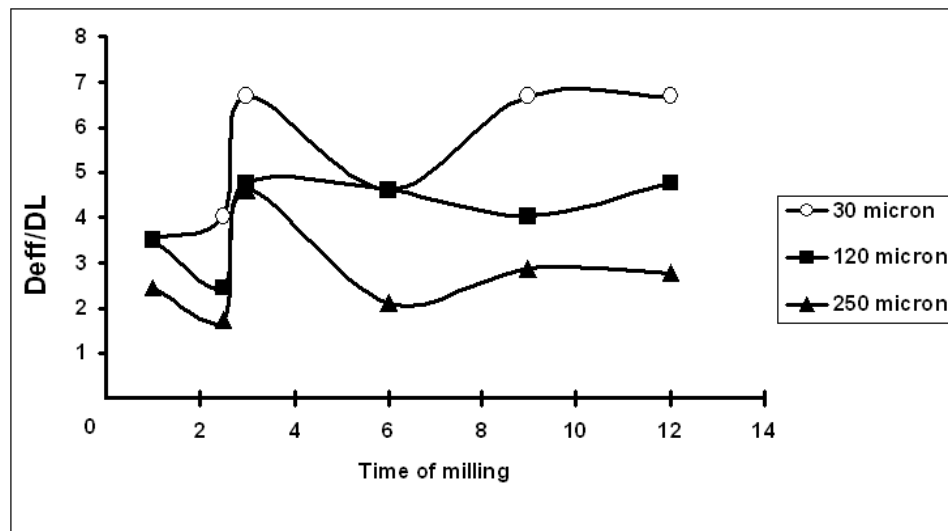
نتايج و بحث

مقادير اصلاح شده ی ضريب نفوذ در زمان ها و فواصل مختلف آسیاکاری در جدول 2 آمده است. از مقایسه ی مقدار ضريب نفوذ اصلاح شده با مقادير قبلی ضريب نفوذ (با توجه به رابطه 1) می توان نشان داد که تنها تاثیر افزایش دانسیته ی نابعجایی ها بر روی نفوذ در حین فرایند آسیاکاری، می تواند معادل افزایش دمایی حدود $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ در سیستم عمل نماید.

جدول 2 مقادیر اصلاح شده ی ضریب نفوذ (D_{eff}) در زمان ها و فواصل مختلف از سطح نمونه ی آسیاکاری شده ، حاصل از مدل ارائه شده ($\times 10^{25}$).

Distances from milled surface (μm)	Milling duration (hr)								
	30	60	120	190	250	320	500	750	opposing surface
1	22	22	22	8.9	14	15	15	6.7	15
3	42	30	30	30	29	29	25	9.8	15
6	29	29	29	21	13	13	12	13	15
9	42	42	25	21	18	18	15	21	15
12	42	42	30	30	18	17	18	18	15

به منظور بررسی ضریب نفوذ اصلاحی توسط مدل ارائه شده و نیز مطالعه ی نحوه ی تغییرات دانسیته ی نابجایی ها در لایه های مختلف آسیاکاری، پارامتر بدون بعد D_{eff}/D_L تعریف شد که در آن D_L میزان نفوذ پذیری شبکه قبل از اصلاح آن توسط مدل ارائه شده می باشد. شکل 1 تغییرات این پارامتر بدون بعد را بر حسب زمان آسیاکاری در فواصل 30، 120 و 250 میکرو متر از سطح آسیاکاری شده نشان می دهد.



شکل 1 نشان دهنده ی تغییرات پارامتر بدون بعد D_{eff}/D_L بر حسب زمان آسیاکاری بر حسب ساعت در فواصل 30، 120 و 250 میکرو متر از سطح آسیاکاری شده (در تماس با گلوله های آسیاکاری).

منحنی رسم شده نشان دهنده ی تغییراتی سینوسی برای این پارامتر بدون بعد می باشد که ناشی از تغییرات نوسانی D_{eff}/D_L در یک بازه ی مشخص می باشد.

بیشترین مقدار D_{eff}/D_L در فاصله ی 30 میکرونی از سطح آسیاکاری شده به دست می آید که نشان دهنده ی بیشترین دانسیته ی نابعایی ها در این لایه ی نازک سخت شده، می باشد.

با بررسی منحنی رسم شده در شکل 1 می توان در یافت که در هر فاصله از سطح آسیاکاری شده، D_{eff}/D_L به صورت نوسانی بر حسب زمان تغییر می کند که مستقیماً ناشی از تغییر دانسیته ی نابعایی ها در زمان های مختلف آسیاکاری است. بررسی های صورت گرفته نشان می دهد که در حین آسیاکاری نابعایی ها دائماً از لایه های زیرین و دورتر از سطح آسیاکاری به سمت لایه های بالایی در حال حرکت بوده و با رسیدن به سطح نمونه که در تماس با گلوله ها می باشد آزاد می شوند. به بیانی دیگر می توان گفت مکانیزم تولید نابعایی ها در لایه های نزدیک به سطح آسیاکاری شده، مهاجرت اتمها از لایه های زیرین می باشد. بنابر این الزاماً با افزایش زمان آسیاکاری در یک لایه ی مشخص، مقدار دانسیته ی نابعایی ها افزایش پیدا نمی کند.

مشابهت موجود بین منحنی های رسم شده در لایه های 30 و 250 میکرو متری در شکل 1 نشان دهنده ی وجود مکانیزمی یکسان جهت تولید نابعایی در این لایه ها می باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله مدلی نوین، ساده و قابل تعمیم جهت بررسی نفوذ در حین آسیاکاری مکانیکی ارائه گردید. در این روش با استفاده از روابط بیان شده ابتدا استحکام ماده ی مورد بررسی از اعداد حاصل از سختی سنجی در لایه ها محاسبه و سپس مقدار دانسیته ی نابعایی ها تخمین زده شد و تنها با در نظر گرفتن اثر نابعایی ها، به عنوان فاکتوری موثر در تسریع نفوذ، اصلاحی برای ضریب نفوذ صورت گرفت. با توجه به مقادیر حاصل از مقادیر اصلاح شده ی ضریب نفوذ می توان نشان داد که افزایش دانسیته ی نابعایی ها در حین آسیاکاری اثری مشابه افزایش دمایی حدود $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ بر نفوذ دارند.

بررسی های صورت گرفته بر روی پارامتر بدون بعد D_{eff}/D_L بر حسب زمان در فواصل مختلف آسیاکاری از سطح آسیا کاری شده، نشان دهنده ی تغییرات نوسانی و سینوسی شکل این پارامتر است.

با استفاده از شکل 1 نحوه ی تولید و حرکت نابعایی ها در حین آسیاکاری بررسی گردید.

با استفاده از بررسی های صورت گرفته از شکل 1 می توان گفت مکانیزم تولید نابعایی ها در لایه های نزدیک به سطح آسیاکاری شده، مهاجرت اتمها از لایه های زیرین می باشد.

مراجع

1. C. Suryanarayana, "Mechanical alloying and milling", Progress in Materials Science ,46,2001,32-35.
2. B.B. Khina and B. Formanek , "Mathematical Modeling of Solid-State Diffusion during Mechanical Alloying", Defect and Diffusion Forum, 249,2006,105-110.
3. Pouya Valizadeh and Meisam Sheikhamiri and Jalil Vahdati Khaki, Surface precipitation hardening of aluminium alloys through mechanochemical process at ambient temperature", 1th Iran International Aluminum Conference (IIAC2009) Tehran, I.R. Iran, April 22-23, 2009,.
4. Laszlo Takacs and Aghasi R. Torosyan, "Surface mechanical alloying of an aluminum plate", Journal of Alloys and Compounds ,434,2007, 686-688.
5. L.Lu and M.O.Lai and S. Zhang, "Diffusion in mechanical alloying",Journal of materials processing technology, 67, 1997,100-104.
6. A.K.Bhattacharya and E.Arzt, "Plastic deformation and its influence on diffusion process during mechanical alloying" , Scripta Metallurgica et Materialia, 28, 1993,395-400.
7. David Tabors, "The Hardness of metals" , 1951,oxford university press inc.
8. I.N. Khan and M.J. Starink and J.L. Yan, " A Model for Precipitation Kinetics and Strengthening in Al-Cu-Mg Alloys", Mater. Sci. Eng. A, 472,2008, 66-74.
9. M.Verdier and I.Groma and I.Flandin and J.Lendvai, " Dislocation densities and stored energy after cold rolling of Al-Mg alloys: investigations by resistivity and differential scanning calorimetry",scripta materialia , 4, 1997,449-454.
10. T. Nakajima and M. Takeda and T. Endo, "Accelerated coarsening of precipitates in crept Al-Cu alloys", Materials Science and Engineering A, 387, 2004, 670-673.