



مقایسه بین مدل های جانسون-کوک و PTW در شبیه سازی فرآیند اسپری سرد

سعید رحمتی^۱، عباس قائی^{۲*}، احمد رضائیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

#اصفهان، کد پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، cc.iut.ac.ir@ghaei

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۲ اسفند ۱۳۹۱

پذیرش: ۲۵ خرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

شبیه سازی

اسپری سرد

نرخ کرنش بالا

اسپری سرد یک فرآیند نسبتاً جدید است که از آن برای پوشش دهی و ساخت قطعات جدید استفاده می‌شود. مطالعات تجربی این فرآیند هم بسیار هزینه‌بر و هم به دلیل سرعت بسیار بالای ذرات خیلی مشکل می‌باشد. به همین دلیل، استفاده از یک شبیه‌سازی با دقت مناسب برای این فرآیند معقول به نظر می‌رسد. با وجود ناتوانی مدل جانسون-کوک در پیش‌بینی تنش سیلان در نرخ کرنش‌های بسیار بالای معمول در این فرآیند، مطالعات نشان می‌دهد که تمامی تحقیقات گذشته از این مدل در شبیه‌سازی این فرآیند استفاده کرده‌اند. بنابراین، انتظار می‌رود که با استفاده از یک مدل ماده مناسب‌تر برای نرخ کرنش‌های بسیار بالا بتوان شبیه‌سازی‌های گذشته را بهبود بخشید. به همین دلیل، در این مقاله، ابتدا مدل PTW در نرم‌افزار آباکوس پیاده‌سازی و سپس با استفاده از آن فرآیند اسپری سرد برای مس شبیه‌سازی شده است. مقایسه نتایج حاصل با نتایج حاصل از مدل جانسون-کوک و نتایج تجربی نشان داد که مدل جانسون-کوک در نرخ کرنش‌های بالا حساسیت زیادی به تغییرات نرخ کرنش نداشته و به همین دلیل جواب‌های قابل قبولی را پیش‌بینی نمی‌کند، ولی در مقابل مدل PTW انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشته و جواب‌های بهتری نسبت به مدل جانسون-کوک ارائه می‌دهد.

A comparative study between Johnson-Cook and PTW models in simulation of cold spray process

Saeed Rahmati¹, Abbas Ghaei^{2*}, Ahmad Rezaeian³

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran, ghaei@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 March 2013
Accepted 15 June 2013
Available Online 04 May 2014

Keywords:
Simulation
Cold Spray
High Strain Rate

ABSTRACT

Cold spray is a process which is used in coating industry and manufacturing of new parts. Experimental studies of this process are expensive and also very difficult due to high velocity of particles. Therefore, one effective method to study this process is its computer simulation. Previous works show that the Johnson-Cook hardening law has been usually used for simulation of this process. However, it is unanimously believed that this model is not able to reproduce the material behavior at extremely high strain rates commonly occurred in the cold spray process. Therefore, the simulation results are expected to improve if a suitable material model for extremely high strain rates is used. In this study, the PTW1 model was implemented in ABAQUS commercial finite element package. The cold spray process was then simulated for copper using both the PTW and Johnson-Cook hardening models. A comparison between the simulation and experimental results showed that the PTW model did improve the simulation results. The predicted flow stress by Johnson-Cook model was also shown to be not so sensitive to strain rate at extremely high strain rates.

۱- مقدمه

باعث ایجاد تغییر شکل در ذره‌ها و زیرلایه شده و همچنین سبب ایجاد پیوندهای مولکولی محکمی بین ذره‌ها و زیرلایه می‌شوند. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد که اتصال و پیوندهای موفقیت‌آمیز تنها در سرعت‌های بالاتر از یک سرعت بحرانی انجام می‌پذیرد و مقدار آن بستگی به دما و خواص مکانیکی-حرارتی ماده اسپری شده دارد [۱].

شکل ۱ شماتیک فرآیند اسپری سرد را نشان می‌دهد. در این فرآیند برای پرتاب ذرات به سمت زیرلایه از یک گاز حرارت داده شده جهت

اسپری سرد یک فرآیند پوشش‌دهی و همچنین فرمینگ نسبتاً جدید است که در آن پودر در دمای پایین توسط جریان یک گاز به سمت سطح مورد نظر با سرعت زیاد پرتاب می‌شود. در مقایسه با فرآیندهای اسپری داغ توسط شعله، قوس و پلاسما، در اسپری سرد ذره در حالت جامد پرتاب شده و معمولاً باعث ذوب زیرلایه نمی‌شود. به دلیل سرعت بالا در این فرآیند، ذره‌ها در لحظه برخورد دارای انرژی جنبشی بسیار زیادی هستند که پس از برخورد

Please cite this article using:

S. Rahmati, A. Ghaei, A. Rezaeian, A comparative study between Johnson-Cook and PTW models in simulation of cold spray process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 188-194, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مدل‌های دیگر جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهد. بنابراین، در این مقاله، مدل PTW در نرم‌افزار آباکوس در قالب یک زیربرنامه پیاده‌سازی شده و از آن برای نخستین بار در شبیه‌سازی فرآیند اسپری سرد استفاده شده است. در پایان نتایج حاصل از این مدل با مدل جانسون-کوک مقایسه شده است.

۲- مدل جانسون-کوک

این مدل توسط جانسون و کوک [۱۴] در سال ۱۹۸۵ میلادی برای اولین بار جهت در نظر گرفتن تاثیر نرخ کرنش و دما بر روی تنش سیلان ارائه شد. این مدل به دلیل سادگی و همچنین توصیف نسبتاً خوب در اکثر فرآیندها به‌زودی به یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در شبیه‌سازی فرآیندها بدل شد و امروزه به-عنوان معروف‌ترین مدل شناخته می‌شود.

تنش سیلان در مدل جانسون-کوک توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

که A ، B ، C و n ، m ثابت ماده، ε_p کرنش پلاستیک مؤثر و $\dot{\varepsilon}_p^*$ برابر $\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0$ کرنش به‌دست می‌آیند و به‌عنوان نرخ کرنش مرجع معرفی می‌شود. همچنین T^* نرم‌شوندگی حرارتی ماده را در دماهای بالا تقریب زده و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

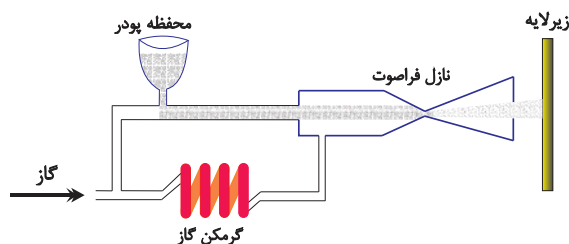
$$T^* = \begin{cases} 0, & T < T_r \\ \frac{T - T_r}{T_m - T_r}, & T_r < T < T_m \\ 1, & T > T_m \end{cases} \quad (2)$$

که T_m دمای ذوب ماده، T دمای ماده و T_r در این رابطه به‌عنوان دمای مرجع به‌کار برده می‌شود که دمای مرجع دمایی است که ثابت مدل جانسون-کوک در آن دما به‌دست آمده‌اند.

مدل جانسون-کوک مدلی کاملاً تجربی است و براساس انطباق با نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد شده است. به همین دلیل، برای به‌دست آوردن ضرایب آن فقط کافی است ضرایب را طوری به‌دست آوریم که پیش‌بینی مدل با نتایج آزمایشگاهی بیشترین انطباق را داشته باشد. ولی علی‌رغم سادگی، همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌گردد، این مدل نمی‌تواند به‌خوبی تغییرات کارسختی را با تغییرات نرخ کرنش نشان دهد. همچنین کارسختی وابسته به نرخ کرنش توسط تابعی خطی از لگاریتم نرخ کرنش بیان می‌شود و به همین دلیل این مدل در نرخ کرنش‌های بسیار بالا توانایی پیش‌بینی صحیح رفتار ماده را ندارد.

۳- مدل PTW

این مدل در سال ۲۰۰۳ میلادی توسط پرستون و همکارانش [۱۵] برای توصیف رفتار مواد تحت فرآیندهایی که در گستره وسیعی از نرخ کرنش‌ها قرار دارند ارائه شد. این مدل پیچیده از نوع مدل‌های ترکیبی است و برپایه حرکت نابجایی‌ها در حین تغییر شکل پلاستیک مواد پایه‌ریزی شده است. تنش سیلان در این مدل توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:



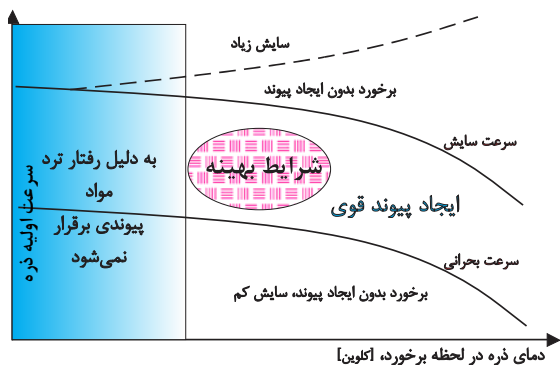
شکل ۱ شماتیک فرآیند اسپری سرد [۱۱]

سرعت‌دادن به ذرات پودر، کاهش استحکام تسلیم و سهولت تغییر شکل ذرات هنگام برخورد استفاده می‌شود. بدیهی است که دمای گاز و ذره پایین‌تر از دمای ذوب ماده اسپری شده (به‌منظور جلوگیری از ذوب موضعی یا استحاله فازی) می‌باشد و به هر حال ذرات در هنگام برخورد با زیرلایه یا لایه رسوب داده شده قبلی در حالت جامد باقی خواهند ماند.

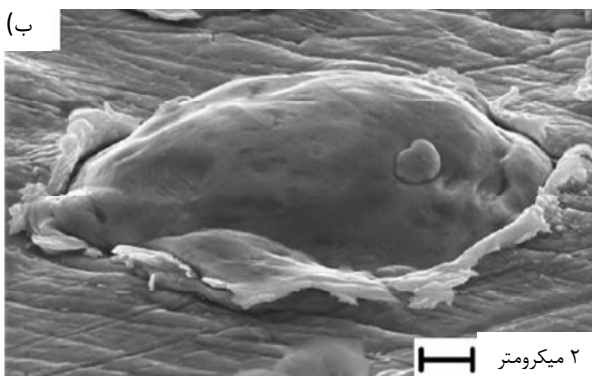
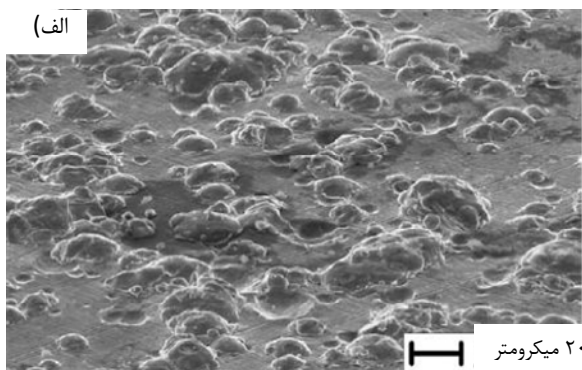
به‌طور کلی مطالعه آزمایشگاهی فرآیندها پرهزینه می‌باشد. به همین دلیل، محققان تلاش می‌کنند تا راه‌های ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر برای یافتن نتایج و دستاوردهای فرآیند مورد نظر خود پیدا کنند. یکی از این راه‌ها شبیه‌سازی فرآیندها می‌باشد. شناخت توانایی‌های فرآیند اسپری سرد در ساخت پوشش‌ها و قطعات جدید از مواد گوناگون نیز، نیازمند آزمایش‌های هزینه‌بر و متعدد می‌باشد. به همین دلیل، تحقیقات بیشتر به‌منظور دستیابی به شبیه‌سازی صحیح این فرآیند لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد.

محدوده نرخ کرنش در فرآیند اسپری سرد بسیار بالا می‌باشد. بنابراین برای یک شبیه‌سازی با دقت مناسب لازم است تا رفتار ماده در محدوده نرخ کرنش‌های رایج در این فرآیند با دقت خوبی پیش‌بینی شود. تا به حال مطالعات و آزمون‌های بسیاری برای محاسبه تنش در نرخ کرنش‌های مختلف انجام شده است. به‌عنوان مثال، برای مس، فولادسی و کوکس [۲] به‌وسیله آزمایش میله هایکینسون مقدار تنش برشی را برای نرخ کرنش‌های 10^{-4} تا 10^4 برثانیه محاسبه کردند. پس از آن تانگ و همکاران [۳] و همچنین هانگ و کلیفتون [۴] محدوده نتایج را تا نرخ کرنش 10^6 برثانیه توسط روش فشار برشی توسعه دادند. سپس مایرز و همکاران [۵] توانستند، به‌کمک القای شوک با لیزر، به نرخ کرنش 10^7 برثانیه دست پیدا کنند. بعد از آن برینگا و همکاران [۶]، از دیدگاه تئوری و محاسبه رفتار دینامیک مولکولی، استحکام برشی مس را در نرخ کرنش 10^9 برثانیه به‌دست آوردند و در آخر مورفی و همکاران [۷] توسط شوک تک‌محوری در فشار ۱۰۰ گیگا پاسکال تنش برشی را در نرخ کرنش 10^{10} برثانیه محاسبه نمودند. نتایج این تحقیقات در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، رفتار مس خالص در نرخ کرنش‌های بالاتر از 10^6 برثانیه کاملاً تغییر نموده و تنش تسلیم در این نرخ کرنش‌ها با شیب زیادی افزایش پیدا می‌کند. همچنین، این شکل گویای این واقعیت است که مدل جانسون-کوک قادر به توصیف صحیح رفتار مس در این محدوده از نرخ کرنش‌ها نیست. به‌علاوه ژائو و ژانگ [۸]، کیم و شین [۹] و نیز لیانگ و خان [۱۰] در تحقیقات خود به این ایراد مدل جانسون-کوک اشاره کرده و نشان داده‌اند که مدل جانسون-کوک تا نرخ کرنش حداکثر 10^4 برثانیه جواب‌های قابل قبولی را ارائه می‌دهد. سرعت ذرات در این فرآیند بسیار بالاست و به همین خاطر در محل برخورد ذرات با یکدیگر و یا با زیرلایه نرخ تغییر شکل بسیار بالا بوده و به نسبت فاصله از محل برخورد این نرخ کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل، نرخ کرنش در این فرآیند از حدود 10^9 برثانیه تا صفر تغییر می‌کند [۱۱] که نشان می‌دهد این فرآیند در محدوده وسیعی از نرخ کرنش‌ها انجام می‌پذیرد.

با وجود ناتوانی مدل جانسون-کوک برای مدل کردن رفتار ماده در نرخ کرنش‌های بالا، تحقیقات ما حاکی از آن است که در تمامی مطالعات انجام گرفته در حوزه شبیه‌سازی این فرآیند، از این مدل استفاده شده است. تا به حال مدل‌های زیادی برای نرخ کرنش‌های بالا ارائه شده‌اند که از میان این مدل‌ها، طبق تحقیقات کیم و شین [۹]، بانرجی [۱۲] و همچنین آن و همکارانش [۱۳]، مدل PTW در محدوده وسیعی از نرخ کرنش‌ها نسبت به



شکل ۳ نمودار محدوده کارایی اسپری و شرایط برخورد ذره، برحسب سرعت و دمای ذره در لحظه برخورد [۱۶]



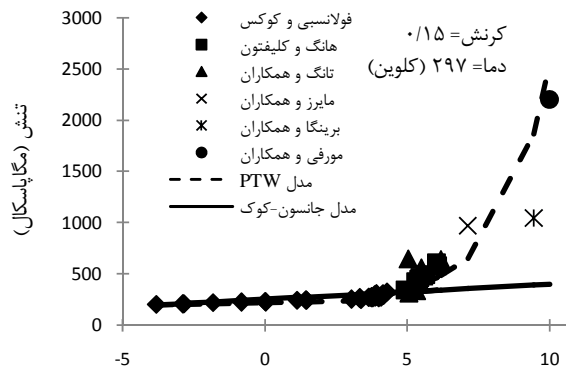
شکل ۴ تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونیکی [۱]

شکل ۴ تصویر میکروسکوپی از برخورد ذرات مس بر روی زیرلایه‌ای از مس را نشان می‌دهد. سرعت برخورد ذرات در محدوده ۵۵۰ تا ۶۷۰ متر بر ثانیه برای ذراتی با ابعاد ۵ تا ۲۵ میکرومتر و در دمای محیط توسط اسدی و همکاران [۱] اندازه‌گیری شده است.

شکل ۴-الف با بزرگ‌نمایی کمتر نسبت به شکل ۴-ب گواه این مطلب است که ۸۰٪ ذراتی که به زیرلایه برخورد می‌کنند به زیرلایه می‌چسبند. نمای درشت‌تر در شکل ۴-ب نشان می‌دهد ذره‌ای که با زیرلایه پیوند محکمی برقرار کرده، توسط حلقه‌ای فواره‌ای شکل با لبه‌های نسبتاً تیز، در محدوده برخورد احاطه شده است. این شکل همچنین نشان می‌دهد که تغییر شکل ذرات ثانویه نیز به تغییر شکلی که ذره اولیه در سطح زیرلایه ایجاد کرده است وابسته می‌باشند [۱].

۵- مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند اسپری سرد از نرم‌افزار آباکوس، که توانایی بالایی در حل مسایل غیرخطی دارد، استفاده شد. قابلیت نرم‌افزار آباکوس را می‌توان با



لگاریتم نرخ کرنش (بر ثانیه)

شکل ۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی [۲-۴] و [۷] و نتایج حاصل از شبیه‌سازی رفتار مولکولی [۶] با مدل‌های جانسون-کوک و PTW

$$\sigma = 2 \left[\tau_s + \alpha \ln \left[1 - \varphi \exp \left(-\beta - \frac{\theta \varepsilon_p}{\alpha \varphi} \right) \right] \right] \mu(p, T) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{s_0 - \tau_y}{d}, \beta = \frac{\tau_s - \tau_y}{\alpha}, \varphi = \exp(\beta) - 1 \quad (4)$$

که در آن ε_p کرنش پلاستیک، τ_s تنش مربوط به حداکثر مقدار کارسختی در ماده که به‌صورت نرمال شده بیان می‌گردد و τ_y تنش تسلیم نرمال شده است. s_0 مقدار τ_s در صفر کلوین، θ ثابت کارسختی و d پارامتر بی‌بعد شده کارسختی مربوط به ماده می‌باشد. همچنین $\mu(p, T)$ مدول برشی ماده است که تابعی از چگالی ماده و دما فرض شده است. τ_y و τ_s توسط روابط زیر تعریف می‌گردند:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_s = \max \left\{ \begin{array}{l} s_0 - (s_0 - s_{\infty}) \operatorname{erf} \left[kT \ln \left(\frac{\gamma \xi}{\dot{\varepsilon}_p} \right) \right] \\ s_0 \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\gamma \xi} \right)^{s_1} \end{array} \right\} \\ \tau_y = \max \left\{ \begin{array}{l} y_0 - (y_0 - y_{\infty}) \operatorname{erf} \left[kT \ln \left(\frac{\gamma \xi}{\dot{\varepsilon}_p} \right) \right] \\ \min \left\{ y_1 \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\gamma \xi} \right)^{y_2}, s_0 \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\gamma \xi} \right)^{s_1} \right\} \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (5)$$

همچنین، s_{∞} مقدار τ_s در نزدیکی دمای ذوب ماده، y_0 و y_{∞} به‌ترتیب مقدار τ_y در صفر کلوین و نزدیکی دمای ذوب ماده، γ و k ثوابت ماده، $\dot{\varepsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک، T برابر T/T_m دمای ماده و T_m دمای ذوب آن می‌باشد. s_1, y_1, y_2 نیز پارامترهای ماده برای نرخ کرنش‌های بالا هستند و:

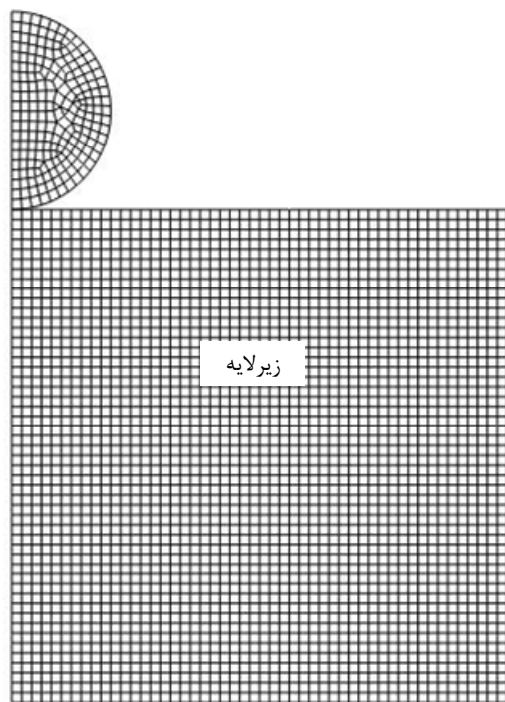
$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi\rho}{3M} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu(\rho, T)}{\rho} \right)^{1/2} \quad (6)$$

که ρ چگالی و M جرم اتمی ماده می‌باشند.

۴- نتایج آزمایشگاهی

با استفاده از روش ارائه شده توسط اسدی و همکاران [۱]، سرعت بحرانی برای مس فاقد اکسید با درجه خلوص ۹۹/۸٪ و ابعاد ذره‌ای که در محدوده ۵ تا ۲۲ میکرومتر قرار دارد، برابر ۵۷۰ متر بر ثانیه به‌دست می‌آید.

شکل ۳ محدوده و شرایط لازم برای اسپری کردن ذره در فرآیند اسپری سرد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای داشتن شرایط ایده‌آل بایستی سرعت ذره در هنگام برخورد در محدوده‌ای میان سرعت بحرانی و سرعت سایش باشد. اگر سرعت ذره از سرعت بحرانی کمتر باشد پیوندی بین ذره و لایه‌های زیرین به‌وجود نمی‌آید و اگر سرعت ذره از سرعت سایش بیشتر باشد، علاوه بر اینکه اتصال و پیوندی میان ذره و لایه‌های رسوب داده شده به‌وجود نمی‌آید، ذره باعث سایش لایه‌های زیرین نیز می‌گردد.



شکل ۵ شماتیک مدل استفاده شده در فرآیند اسپری سرد

جدول ۳ خواص استفاده شده در شبیه‌سازی برای مس فاقد اکسید [۱۸] و [۱۹]

۸۹۶۰	چگالی، kg/m^3
۳۱۸	ضریب هدایت گرمایی، $\text{W/(m}^\circ\text{K)}$
۳۸۳	ضریب گرمای ویژه، $\text{J/(kg}^\circ\text{K)}$
۱۳۵۶	نقطه ذوب، K
۴۵	مدول برشی، GPa
۳۹۳۳۰۰۰، ۱/۵، ۱/۹۹	ضرایب روش EOS، C_0, s, Γ_0
۲۹۷	دمای مرجع، K
۹۰٪	درصد تبدیل کار پلاستیک به حرارت

به‌خاطر چسبندگی بسیار خوب مس در فرآیند اسپری سرد، مطالعات آزمایشگاهی بسیار زیادی روی این ماده انجام شده است [۱۷، ۱۶، ۱]. در این مطالعه نیز فرض می‌گردد هم پودر و هم زیرلایه از مس تشکیل شده است. خواص و پارامترهای استفاده شده در جداول ۱ تا ۳ نشان داده شده است. خواص گرمایی و مکانیکی به‌صورت همسانگرد فرض شده‌اند و دمای اولیه ذره و زیرلایه ۲۹۷ کلوین در نظر گرفته شده و سرعت اولیه ذره در لحظه برخورد برابر ۵۷۰ متر بر ثانیه فرض شده و زمان کلی حل مساله ۰/۱۵ میکروثانیه در نظر گرفته شده است.

همچنین برای محاسبه رفتار ماده در شرایط الاستیک از معادلات حالت مای-گرونیژن^۴ خطی استفاده شد، زیرا معادلات الاستیک خطی معمول برای حل شبیه‌سازی‌های معمولی، مخصوصاً برای سرعت‌های کم در برخورد ذرات، جواب‌های قابل قبولی را ارائه می‌دهند و به همین دلیل در سرعت‌های بالا معادلات مای-گرونیژن جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهند [۱].

۶- نتایج

در اثر برخورد ذره به زیرلایه، به‌دلیل سرعت بالا و در نتیجه انرژی جنبشی بالا، ذره و زیرلایه هر دو دچار تغییر شکل با نرخ کرنش بسیار بالا می‌شوند. واضح است که مقدار نرخ کرنش در مناطق مختلف ذره و زیرلایه مقادیر

نوشتن زیربرنامه به کمک زبان فرترن^۱ افزایش داد. در حال حاضر، آباکوس فقط مدل کارسختی جانسون-کوک را برای نرخ کرنش‌های بالا در کتابخانه ماده خود دارد. به همین خاطر، برای حل مسائلی که با معادلات کارسختی دیگری به‌جز جانسون-کوک حل می‌شوند، می‌توان از زیرروال کارسختی^۲ استفاده نمود و معادلات مورد نظر را برای این نرم‌افزار تعریف کرد. وظیفه زیرروال کارسختی در نرم‌افزار آباکوس محاسبه مقدار کارسختی در هر نمو^۳ از حل می‌باشد. به همین خاطر، این زیرروال در هر نمو چندین ورودی از جمله مقدار کرنش پلاستیک موثر، نرخ کرنش پلاستیک موثر، دما و ... را دریافت و پس از انجام یک سری محاسبات به‌صورت صریح، مقدار کارسختی مربوط به آن نمو را تولید می‌کند. به همین دلیل، در این مقاله، برای استفاده از مدل PTW، ابتدا این مدل در نرم‌افزار آباکوس توسط زیرروال مربوط به کارسختی پیاده‌سازی و سپس از آن برای شبیه‌سازی فرآیند اسپری سرد استفاده شد. به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند اسپری سرد، برخورد یک ذره با زیرلایه توسط روش صریح در آباکوس به‌صورت متقارن محوری مدل شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. در این تحقیق پودر به شکل یک کره کامل با شعاع ۲۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است و زیرلایه به‌صورت یک استوانه، که شعاع و ارتفاع آن پنج برابر ذره می‌باشد، مدل شده است. البته شایان ذکر است که انجام شبیه‌سازی‌های مختلف با اندازه‌های ده برابر ذره و پانزده برابر ذره برای زیرلایه نشان داد که در نظر گرفتن ابعاد بزرگ‌تر برای زیرلایه تاثیر چندانی روی نتایج شبیه‌سازی نداشته که این نتیجه منطبق بر کار لی و همکارانش می‌باشد [۱۷]. به‌منظور بررسی حساسیت نتایج به‌اندازه مش، چندین مش مختلف با اندازه‌های مختلف استفاده شد و مشی که به‌ازای آن نتایج همگرا شد، انتخاب گردید. برای برخورد ذره به زیر لایه از یک قید تماسی صفحه به صفحه استفاده شده و ضریب اصطکاک نیز برابر ۰/۴ مطابق مرجع [۱۷] در نظر گرفته شد.

جدول ۱ ضرایب و پارامترهای مدل جانسون-کوک برای مس فاقد اکسید [۱]

۹۰ (MPa)	A
۲۹۲ (MPa)	B
۰/۰۲۵	C
۱/۰۹	M
۰/۳۱	n
۲۹۷ (K)	دمای مرجع
۱ (s^{-1})	نرخ کرنش مرجع

جدول ۲ ضرایب و پارامترهای مدل PTW برای مس فاقد اکسید [۱۵]

۰/۰۰۸۵	s_0
۰/۰۰۰۵۵	s_{∞}
۰/۰۰۰۱	γ_0
۰/۰۰۰۱	γ_{∞}
۰/۱۱	k
۰/۰۰۰۰۱	γ
۰/۰۲۵	θ
۶۳/۵۴۶	M (amu)
۲	d
۰/۲۵	s_1
۰/۰۹۴	γ_1
۰/۵۷۵	γ_2

1- Fortran
2- VUHARD
3- Increment

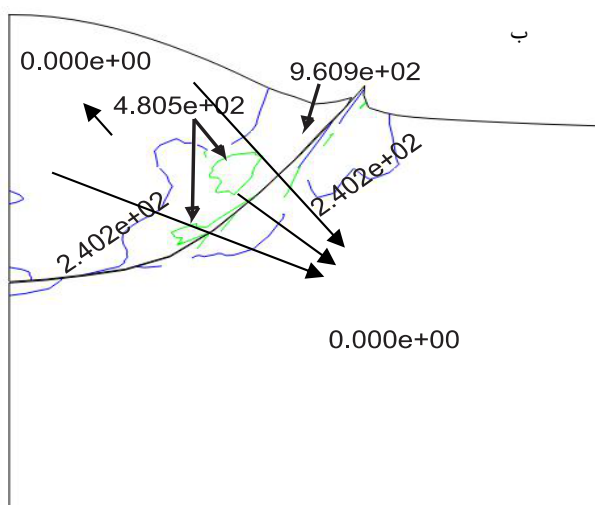
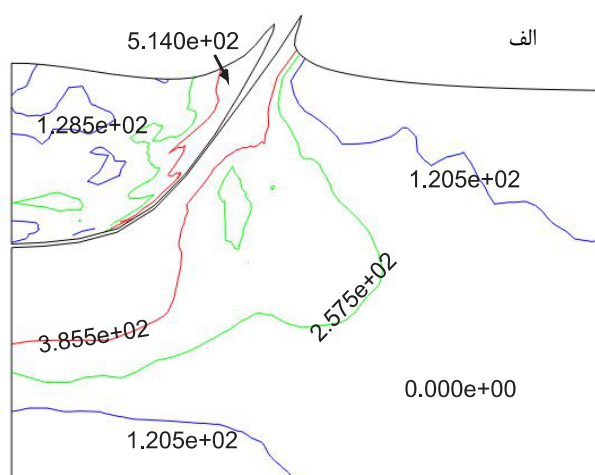
4- Mie-Gruneisen equation of state (EOS)

نکته دیگر قابل توجه مقدار فرورفتگی ذره در زیرلایه است که در مدل جانسون-کوک ذره پس از برخورد کاملاً در زیرلایه فرورفته و حتی تقریباً هم ارتفاع سطح اولیه زیرلایه می‌شود. با یک مقایسه ساده بین شکل‌های ۶-الف و ۶-ب و نتایج آزمایشگاهی که در شکل ۴-ب نشان داده شده است، می‌توان مشاهده نمود که پیش‌بینی مدل PTW به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. همچنین در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود که مدل PTW حداکثر تنش در طی فرآیند را ۹۶۰ مگاپاسکال نشان داده در حالی که حداکثر تنش در مدل جانسون-کوک به مقدار ۵۱۴ مگاپاسکال می‌رسد (شکل ۷-الف).

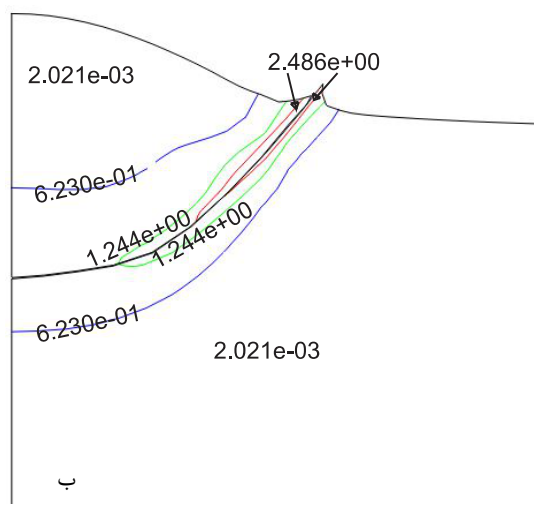
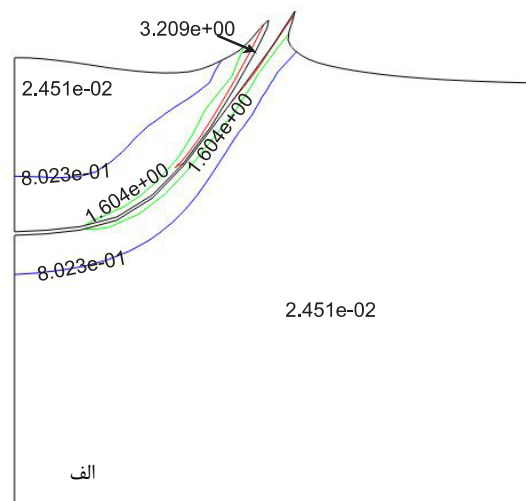
شکل ۸ تاریخچه تنش سیلان که توسط دو مدل جانسون-کوک و PTW به‌دست آمده است را برای نخستین‌المان از ذره که به زیرلایه برخورد می‌کند نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، مدل جانسون-کوک به‌صورت نسبی تنش کمتری را نسبت به مدل PTW پیش‌بینی می‌کند و به‌نظر می‌رسد تغییر شکل زیاد ذره در مدل جانسون-کوک به همین خاطر باشد. همچنین، در انتهای فرآیند تنش در مدل PTW کاهش زیادی پیدا کرده است. دو عامل نرم‌شوندگی حرارتی و کم‌شدن نرخ کرنش به‌طور هم‌زمان و یا جداگانه می‌توانند در این کاهش مؤثر باشند. برای بررسی این موضوع، تنش سیلان در طول فرآیند بدون درنظر گرفتن اثر دما (عامل نرم‌شوندگی حرارتی) محاسبه شد، که نتایج آن در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است.

متفاوتی دارند. به عبارت دیگر ماده‌ای که در محل تماس قرار دارد دچار بیشترین نرخ تغییر شکل و مناطق دورتر نرخ تغییر شکل کمتری دارند. پس از برخورد ذره به سطح و شروع تغییر شکل، دو عامل به‌طور هم‌زمان ولی معکوس یکدیگر روی تنش سیلان تأثیر می‌گذارند. عامل اول کارسختی است که با افزایش تغییر شکل باعث افزایش تنش سیلان می‌شود. عامل دوم نرم‌شوندگی حرارتی است که به‌دلیل افزایش دمای ماده در اثر تغییر شکل پلاستیک باعث کاهش تنش سیلان می‌شود. بنابراین، جهت پیش‌بینی صحیح تنش سیلان، مدل باید قادر باشد تا هم‌زمان هر دو پدیده را توصیف نماید. البته شایان ذکر است اثر نرخ کرنش نیز بایستی به‌درستی پیش‌بینی شود. واضح است در صورتی که در مدل به هر دلیل تنش سیلان از مقدار واقعی آن کمتر درنظر گرفته شود، تنش‌های داخلی کمتری در ماده به‌وجود آمده و در نتیجه مقدار تغییر شکل پیش‌بینی شده توسط مدل بیشتر خواهد بود. بنابراین، شکل ذره پس از تغییر شکل می‌تواند به‌عنوان یک معیار برای صحت پیش‌بینی تنش سیلان درنظر گرفته شود.

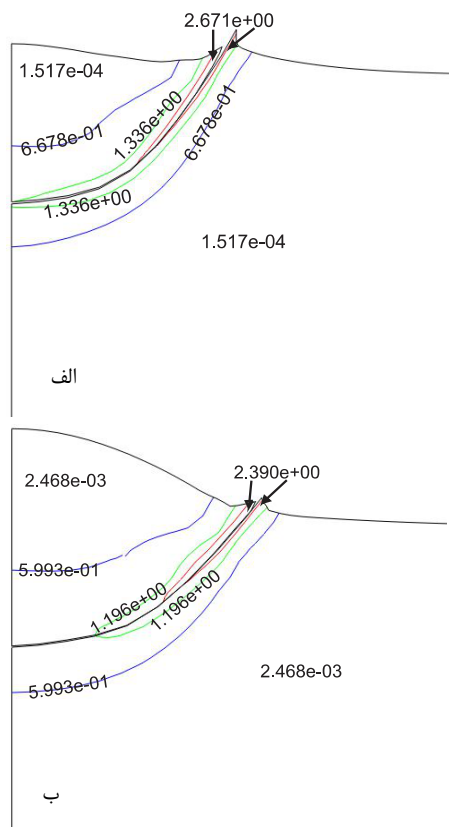
وجود کارسختی پایین و یا نرم‌شوندگی حرارتی زیاد در مدل جانسون-کوک باعث شده در شبیه‌سازی فرآیند اسپری سرد، ذره در برخورد با زیرلایه دچار تغییر شکل زیادی شود که این تغییر شکل زیاد سبب ایجاد لبه‌های تیز و بلندی در محل برخورد شده است.



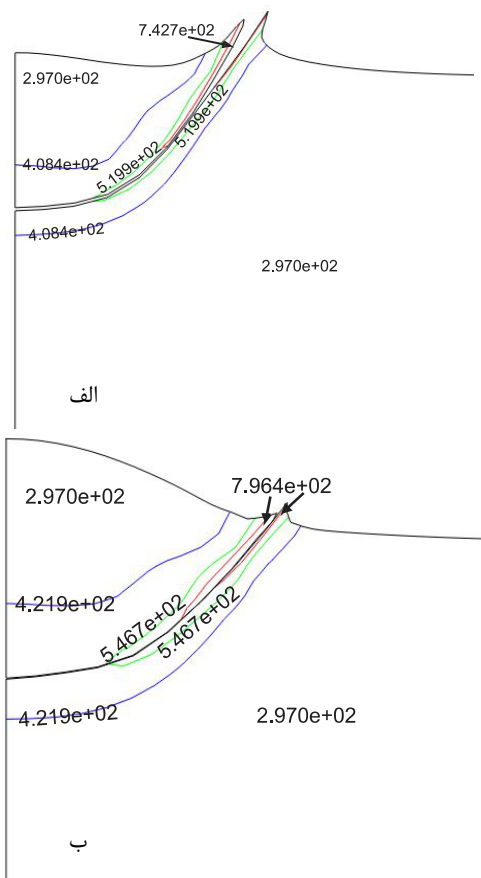
شکل ۷ کانتور تنش سیلان، الف) پیش‌بینی مدل جانسون-کوک، ب) پیش‌بینی مدل PTW



شکل ۶ کانتور کرنش پلاستیک مؤثر، الف) پیش‌بینی مدل جانسون-کوک، ب) پیش‌بینی مدل PTW



شکل ۱۰ کانتور کرنش پلاستیک مؤثر بدون در نظر گرفتن اثر دما، (الف) پیش‌بینی مدل جانسون-کوک، (ب) پیش‌بینی مدل PTW



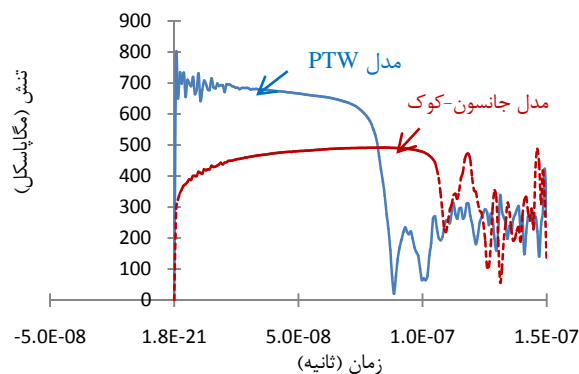
شکل ۱۱ کانتور دما، (الف) پیش‌بینی مدل جانسون-کوک، (ب) پیش‌بینی مدل PTW

شکل ۱۱ کانتور دما برای ذره و زیرلایه و شکل ۱۲ تغییرات دما برای نخستین المان از ذره که به زیرلایه برخورد می‌کند را برای هر دو مدل جانسون-کوک و PTW نشان می‌دهند. در محل برخورد ذره و زیرلایه دما بالا می‌رود و با بالا رفتن دما انتظار می‌رود که به دلیل خاصیت نرم‌شوندگی حرارتی، تنش سیلان در این قسمت‌ها کاهش پیدا کند، اما با مقایسه بین شکل‌های ۶ و ۱۰ و همچنین شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که تفاوت زیادی بین نتایج در شبیه‌سازی اصلی و شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن اثر دما وجود ندارد و اثر نرم‌شوندگی حرارتی در هیچ‌کدام از این دو مدل به خوبی نشان داده نمی‌شود. از طرفی در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که مدل جانسون-کوک نسبت به کم و زیاد شدن نرخ کرنش حساسیت زیادی ندارد و در مقابل مدل PTW این تغییرات را به خوبی نشان می‌دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت که کاهش زیاد تنش در مدل PTW به دلیل کاهش در نرخ کرنش بوده و در مقابل در مدل جانسون-کوک، به خاطر ناتوانی مدل، این کاهش در تنش دیده نمی‌شود.

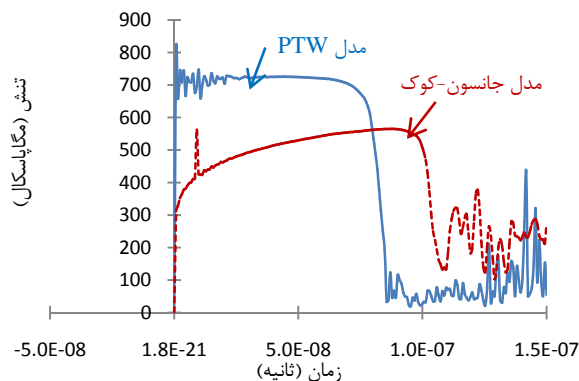
۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از پیاده‌سازی مدل PTW در آباکوس در قالب یک زیربرنامه، فرآیند اسپری سرد توسط این مدل شبیه‌سازی شد تا نتایج حاصل از این مدل با نتایج حاصل از مدل جانسون-کوک مقایسه شود. نتایج به دست آمده از این دو مدل نشان داد که:

۱- مدل جانسون-کوک توانایی محاسبه صحیح مقدار تنش سیلان را در نرخ کرنش‌های بالا نداشته و مدل PTW مطابقت بهتری را با نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل جانسون-کوک نشان می‌دهد.

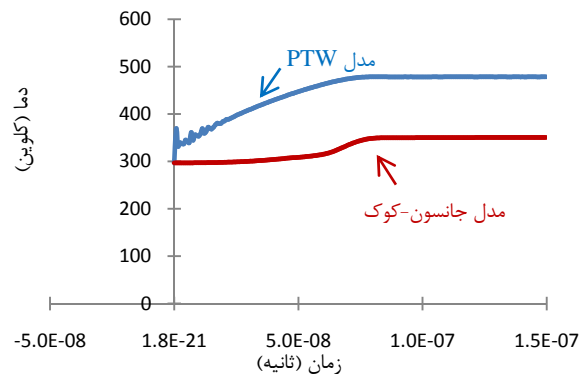


شکل ۱۲ تاریخچه تنش سیلان در مدل‌های جانسون-کوک و PTW برای نخستین المان از ذره که به زیرلایه برخورد می‌کند



شکل ۱۳ تاریخچه تنش سیلان بدون در نظر گرفتن اثر دما در طول فرآیند، برای نخستین المان از ذره که به زیرلایه برخورد می‌کند

- [5] M. A. Meyers, F. Gregori, B. K. Kad, M. S. Schneider, D. H. Kalantar, B. A. Remington, G. Ravichandran, T. Boehly, J. S. Wark, Laser-induced shock compression of monocrystalline copper: characterization and analysis, *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 1211-1228, 2003.
- [6] E. M. Bringa, K. Rosolankova, R. E. Rudd, B. A. Remington, J. S. Wark, M. Duchaineau, D. H. Kalantar, J. Hawreliak, J. Belak, Shock deformation of face-centred-cubic metals on subnanosecond timescales, *Nature Materials*, Vol. 5, pp. 805-809, 2006.
- [7] W. J. Murphy, A. Higginbotham, G. Kimminau, B. Barbrel, E. M. Bringa, J. Hawreliak, R. Kodama, M. Koenig, W. McBarron, M. A. Meyers, B. Nagler, N. Ozaki, N. Park, B. Remington, S. Rothman, S. M. Vinko, T. Whitcher, J. S. Wark, The strength of single crystal copper under uniaxial shock compression at 100 GPa, *Journal of Physics*, Vol. 22, pp. 1-5, 2010.
- [8] C. Y. Gao, L. C. Zhang, Constitutive modelling of plasticity of fcc metals under extremely high strain rates, *International Journal of Plasticity*, Vol. 32-33, pp. 121-133, 2012.
- [9] J. B. Kim, H. Shin, Comparison of plasticity models for tantalum and a modification of the PTW model for wide ranges of strain, strain rate, and temperature, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 746-753, 2009.
- [10] R. Liang, A. S. Khan, A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures, *International Journal of Plasticity*, Vol. 15, pp. 963-980, 1999.
- [11] A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, V. M. Fomin, *Cold Spray Technology*, Elsevier, p. 332, 2006.
- [12] B. Banerjee, An evaluation of plastic flow stress models for the simulation of high-temperature and high-strain-rate deformation of metals, *cond-mat. mtrl-sci*, pp. 43, 2005.
- [13] K. Ahn, H. Huh, L. Park, Comparison of dynamic hardening equations for metallic materials with the variation of crystalline structures, in *Proceeding of 5th International Conference on High Speed Forming*, Dortmund, Germany, pp. 165-176, 2012.
- [14] G. R. Johnson, W. H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, pp. 31-48, 1985.
- [15] D. L. Preston, D. L. Tonks, D. C. Wallace, Model of plastic deformation for extreme loading conditions, *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, pp. 211-221, 2003.
- [16] T. Schmidt, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye, H. Assadi, High velocity impact phenomena and coating quality in cold spraying, in *Proceeding of Thermal spray 2005: Thermal spray connects: Explore its surfacing potential*, pp. 232-238, Basel, Switzerland, 2005.
- [17] W. Y. Li, C. Zhang, C. J. Li, H. Liao, Modeling aspects of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 18, pp. 921-933, 2009.
- [18] A. C. Mitchell, W. J. Nellis, Shock compression of aluminum, copper, and tantalum, *Journal of Applied Physics*, Vol. 52, pp. 3363-3374, 1981.
- [19] R. A. MacDonald, W. M. MacDonald, Thermodynamic properties of fcc metals at high temperatures, *Physical Review B*, Vol. 24, pp. 1715-1724, 1981.



شکل ۱۲ تاریخچه تغییرات دما در مدل‌های جانسون-کوک و PTW، برای نخستین المان از ذره که به زیرلایه برخورد می‌کند

۲- تغییر شکلی که مدل جانسون-کوک برای ذره پیش‌بینی می‌کند بسیار دور از واقعیت بوده و مدل PTW نسبت به مدل جانسون-کوک پیش‌بینی بهتری را ارائه می‌دهد.

۳- در این فرآیند هر دو مدل جانسون-کوک و PTW، خاصیت نرم‌شوندگی حرارتی که در ماده به‌وجود می‌آید را به‌خوبی نشان نمی‌دهند.

۴- مدل جانسون-کوک نسبت به تغییرات نرخ کرنش در طول فرآیند حساسیت زیادی از خود نشان نمی‌دهد، در صورتی که مدل PTW این تغییرات را بهتر نشان می‌دهد.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، مدل PTW نسبت به مدل جانسون-کوک توانایی بیشتری در مدل کردن فرآیند اسپری سرد داشته و بهتر است از این پس برای شبیه‌سازی این فرآیند، جایگزین مدل جانسون-کوک شود.

۸- مراجع

- [1] H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye, Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 4379-4394, 2003.
- [2] P. S. Follansbee, U. F. Kocks, A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable, *Acta Materialia*, Vol. 36, pp. 81-93, 1988.
- [3] W. Tong, R. J. Clifton, Pressure-shear impact investigation of strain rate history effects in oxygen-free high-conductivity copper, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 40, pp. 1251-1294, 1992.
- [4] S. Huang, R. J. Clifton, Dynamic response of OFHC copper at high shear strain rates, In *Proceeding of Macro- and Micro-mechanics of high velocity deformation and fracture*, Eds. K. Kawanta, J. Shiori, Springer-Verlag, Berlin, pp. 63-67, 1987.