



## مدلسازی و بررسی هندسه پین و دامنه نوسان بر تنش پسماند در فرآیند کوبش فراصوتی

عباس پاک<sup>۱\*</sup>، حامد صمیمی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: a.pak@basu.ac.ir

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ مرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۱ شهریور ۱۴۰۳

## کلیدواژگان:

چکش کاری فراصوتی

مدلسازی

تنش پسماند

آلومینیوم

## چکیده

فناوری کوبش فراصوتی یکی از فناوری‌های جدید تغییر شکل پلاستیک سرد است، که در آن ابزار ارتعاشی با حرکات رفت و برگشتی با فرکانس بالا، به سطح قطعه کار ضربه زده و موجب تغییر شکل پلاستیک شدید در سطح می‌شود. اعمال ضربات فراصوتی در سطح مواد باعث افزایش سختی سطح، ایجاد تنش پسماند فشاری، کاهش اندازه دانه‌ها، کاهش زبری سطح و تغییر الگوی سطح خواهد شد. در فرآیند چکش کاری فراصوتی ضربات از طریق پین به قطعه کار منتقل می‌شود. لذا مشخصات پین شامل شکل هندسی، طول، قطر و زاویه برخورد در فرآیند چکش کاری فراصوتی مهم می‌باشد. هدف از این مقاله بررسی هندسه پین و اثر آن بر مقدار و عمق تنش بوسیله شبیه سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس است. با توجه به نتایج مدلسازی با افزایش دامنه نوسان، حداکثر تنش پسماند فشاری و عمق تنش پسماند فشاری افزایش یافت. در مدلسازی فرایند چکش کاری فراصوتی با افزایش قطر پین از ۳ به ۵ میلی متر حداکثر تنش پسماند فشاری کاهش یافته و عمق تنش افزایش یافت. همچنین افزایش شعاع نوک پین باعث افزایش تنش پسماند فشاری و کاهش عمق تنش گردیده است.

## Modeling and investigation of pin geometry and vibration amplitude on the residual stress in ultrasonic hammer peening process

Abbas Pak<sup>1\*</sup>, Hamed Samimi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

\* Corresponding Author's Email: a.pak@basu.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 11 August 2024

Accepted: 1 September 2024

## Keywords:

Ultrasonic Hammer Peening

Simulation

Residual Stress

Aluminum

## Abstract

Ultrasonic hammer peening process is one of the new technologies of cold plastic deformation, in which a tool with high-frequency vibration impacts the surface of the workpiece and causes severe plastic deformation on the surface. Applying ultrasonic impacts to the material surface will increase the hardness of the surface, induce compressive residual stress, reduce the grain size, reduce the surface roughness and change the surface texture. In the process of ultrasonic hammer peening, the impacts are transferred to the workpiece through the pin. Therefore, pin specifications including geometric shape, length, diameter and impact angle are important in ultrasonic hammer peening process. The purpose of this article is to investigate the geometry of the pin and its effect on the amount and depth of stress by numerical simulation using Abaqus software. According to the modeling results, the maximum compressive residual stress and the depth of the compressive residual stress increased with the increase of the vibration amplitude. In the modeling of the ultrasonic hammer peening process, by increasing the diameter of the pin from 3 to 5 mm, the maximum compressive residual stress decreased and the stress depth increased. Also, increasing the pin tip radius has increased the compressive residual stress and decreased the stress depth.

## Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Pak A, Samimi H. Modeling and investigation of pin geometry and vibration amplitude on the residual stress in ultrasonic hammer peening process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Oct 22;11(8):32-42. doi: 10.22034/ijme.2024.472812.1995 [In Persian]

## ۱- مقدمه

امروزه در بیشتر مواد مورد استفاده در صنایع پیشرفته با توجه به شرایط خاص کاربردی آنها معمولاً خواص ناحیه سطحی این مواد با خواص مواد پایه متفاوت می‌باشد. برای بهبود خواص سطحی مواد از فناوری‌های مهندسی سطح استفاده می‌گردد. فرایندهای مختلف و گوناگونی جهت بهبود خواص سطحی آلیاژها مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ یکی از این روش‌ها که امروزه مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از نوسانات فراصوتی می‌باشد [۱]. فرایند کوبش فراصوتی یک روش کار سرد است که با ایجاد یک لایه سخت در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید در مقایسه با روش‌های دیگر مانند ساچمه‌پاشی معمولی، ساچمه‌پاشی با فرکانس بالا، صیقل‌کاری سطحی و فرایند سطحی لیزری کنترل‌پذیرتر است [۲، ۳]. در این فرایند ابزار ارتعاشی با حرکات رفت و برگشتی با فرکانس بالا، به سطح قطعه کار ضربه زده و موجب تغییر شکل پلاستیک شدید در سطح می‌شود. اعمال ضربات فراصوتی در سطح مواد باعث افزایش سختی سطح، ایجاد تنش پسماند فشاری، کاهش اندازه دانه‌ها (در حد نانو)، کاهش زبری سطح و تغییر الگوی سطح خواهد شد. سرعت انجام عملیات، تنوع در ابزار، ضخامت کم منطقه متأثر از عملیات سطحی و کنترل پذیری فرایند از ویژگی‌های به‌کارگیری امواج فراصوتی در عملیات سطحی است [۴]. مطالعات متعدد نشان می‌دهد که یکی از پارامترهای مهم فرایند کوبش فراصوتی که بر توزیع تنش، خواص سطحی و درجه تغییر شکل پلاستیک اثر دارد هندسه پین شامل قطر، طول و شعاع نوک پین است. در فرایند چکش‌کاری فراصوتی ضربات از طریق پین به قطعه کار منتقل می‌شود. لذا مشخصات پین شامل شکل هندسی، طول، قطر و شعاع نوک پین در فرایند چکش‌کاری فراصوتی مهم می‌باشد [۵].

مطالعات اولیه در خصوص استفاده از فرایند کوبش فراصوتی جهت تغییرخواص سطحی مواد در سال ۱۹۵۰ توسط موخانوف و موردوینتسو صورت گرفت. بر اساس این تحقیقات با ایجاد ارتعاش مداوم فراصوت در نوک یک ترانسدیوسر فراصوتی ماده تحت مستقیم ضربه قرار گرفته است. در این فرایند با اعمال ضربه ارتعاشی با فرکانس بیشتر از ۲۰ کیلوهرتز بر روی مواد، تنش‌های کششی حذف و فضاهای خالی بسته می‌شوند؛ همچنین تنش پسماند فشاری توسط یک تغییر شکل شدید پلاستیک ایجاد می‌شود [۶، ۷]. جانز گرام و همکاران [۸] به مطالعه تاثیرات فرایند کوبش فراصوتی بر آلیاژ AA7075 آلومینیوم پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست آمده با اعمال ضربات به سطح ماده و ایجاد تغییر شکل پلاستیک موجب یکنواختی سطح و افزایش سختی سطح شده است. از طرفی با افزایش توان ضربات به سطح زبری سطح در آلیاژ ۷۰۷۵ افزایش یافته است. سون و همکاران [۹] تاثیر کوبش فراصوتی بر آلیاژ AA7150 آلومینیوم پرداختند در این تحقیق با افزایش دامنه ارتعاشات ضخامت ناحیه تحت تاثیر به صورت قابل توجهی افزایش و زبری سطح کاهش یافته است. ژانگ و همکاران [۱۰] به مطالعه بر روی عملکرد خستگی اتصال جوش داده شده نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ با کوبش فراصوتی پرداختند. تجزیه و تحلیل شکست نمونه‌ها نشان داد که ترک خستگی نمونه‌ها از دانه‌های درشت منشأ شده است. استفاده از فرایند چکش‌کاری فراصوتی و ضربه باعث بروز ترک‌های خستگی و در نتیجه کاهش استحکام خستگی مفصل آلومینیوم ۶۰۶۱ است. یوسفی و همکاران [۱۱] به بررسی اثر کوبش فراصوتی بر روی آلومینیوم آلیاژ AA7075 پرداختند. در این مطالعه مشاهده شد که خواص سطحی آلومینیوم همچون سختی و زبری سطح نسبت به نمونه اصلی بهبود یافته است. همچنین تغییر شکل پلاستیک شدید موجب ایجاد تنش‌های پسماند فشاری و کوچک شدن ریز ساختار شده است. دینگ و همکاران [۱۲] اثر فرایند کوبش فراصوتی بر مقاومت به خوردگی در مفصل جوش داده شده از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را بررسی نموده و نشان دادند که افزایش سختی، کاهش زبری سطح و تغییر ساختار متالورژیکی باعث افزایش مقاومت به خوردگی گردیده است. محمود و همکاران [۱۳] اثرات کوبش فراصوتی بر خواص مکانیکی و استحکام خستگی آلیاژ AA1100 را بررسی نموده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که عملیات چکش‌کاری فراصوتی باعث افزایش سختی و در نتیجه بهبود افزایش مقاومت به خستگی مواد شده است. صمیمی و همکاران [۱۴] بهبود خواص سایشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را با استفاده از فرایند چکش‌کاری فراصوتی بررسی نموده‌اند. دامنه نوسان، سرعت دورانی و نرخ پیشروی به‌عنوان پارامترهای فرایند انتخاب شده و نتیجه گرفته شد با افزایش دامنه نوسان تنش پسماند کاهش، سختی افزایش و مقاومت به سایش ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

بر اساس بررسی تحقیق‌های انجام شده مشاهده شد که نرخ پیشروی، نیروی استاتیکی، مدت زمان ضربه، تعداد مراحل کوبش، هندسه پین (قطر، طول شعاع نوک)، زاویه برخورد پین، دامنه و فرکانس نوسان از متغیرهای موثر بر فرایند کوبش فراصوتی می‌باشد. این متغیرها بر خواص مورفولوژی و خواص مکانیکی مواد شامل سختی، سایش، فرسایش، خستگی، تنش تسلیم، شکست، زبری،

خوردگی، اصطکاک، پالایش دانه، استحکام، تخلخل، عمق نفوذ و تنش پسماند تاثیر دارند. در نتیجه هدف از این تحقیق مدل سازی و بررسی هندسه پین به عنوان یک متغیر موثر در فرایند کوبش فراصوتی و اثر آن بر مقدار تنش ایجاد شده در سطح قطعه کار است.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق جهت تعیین ابعاد بهینه پین و دامنه نوسان از روش شبیه سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس و تحلیل گر صریح استفاده شده است. با توجه به تاثیر زیاد شکل هندسه پین و دامنه نوسان در فرایند چکش کاری فراصوتی متغیرهای مربوط به قطر، شعاع نوک پین و دامنه نوسان برای مدلسازی انتخاب و اثر آنها بر روی عمق تنش و مقدار بیشینه تنش به عنوان پاسخ فرایند بررسی گردیده است. متغیرهای اصلی فرایند به همراه علامت اختصاری و محدوده آنها در جدول ۱ آورده شده است. محدوده بالایی یک متغیر با عدد +۱ و محدوده پایینی با عدد -۱ کدگذاری می شود. با توجه به تعداد متغیرهای اصلی انتخاب شده، ماتریس طراحی آزمایش به کار رفته جهت مدل سازی در این پژوهش بر پایه طراحی مرکب مرکزی متشکل از ۲۰ اجرا شده است.

جدول ۱ متغیرهای اصلی فرایند چکش کاری فراصوتی به همراه علامت اختصاری و محدوده آنها

متغیر	واحد	علامت اختصاری	محدوده		
			-1	0	+1
دامنه نوسان	$\mu\text{m}$	A	10	11.5	13
شعاع نوک پین	mm	B	1	2	3
قطر پین	mm	C	3	4	5

قطعه کار مورد استفاده در شبیه سازی، صفحه ای به ابعاد  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 20\text{mm}$  انتخاب شد. ابعاد پین به صورت یک استوانه به طول ۳۰ میلی متر، قطر پین ۳، ۴ و ۵ میلی متر و شعاع نوک پین ۱، ۲ و ۳ میلی متر می باشد.

در فرایند چکش کاری فراصوتی، پین با توجه به تغییر شکل ناچیز به صورت صلب در نظر گرفته شده است. قطعه کار نیز از جنس آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 می باشد که با توجه به ماهیت ضربه ای بودن چکش کاری فراصوتی و ایجاد تغییر شکل های قابل توجه در قطعه کار، خواص آن به صورت ضرایب جانسون - کوک در نرم افزار آباکوس وارد شده است. در جدول ۲ خواص الاستیک و پلاستیک ماده و ضرایب مورد استفاده در نرم افزار آورده شده است [۱۱]. در این شبیه سازی از تاثیر دما صرف نظر شده و فرایند در دمای اتاق انجام شده است.

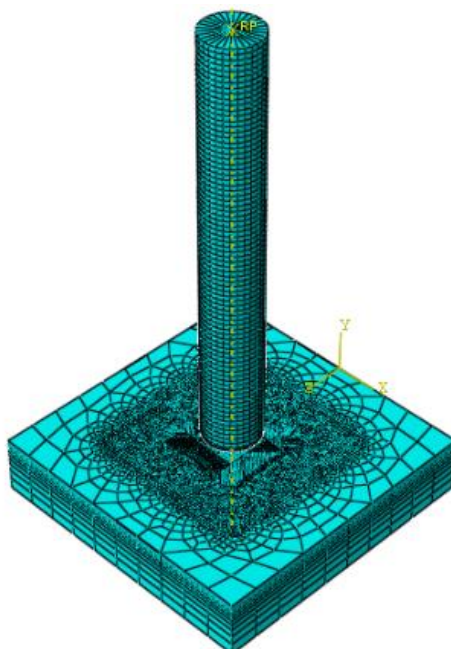
جدول ۲ خواص و ضرایب معادله جانسون کوک برای آلومینیوم Al6061-T6 [۱۱]

مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	A	B	C	n	m
69	0.3	324	114	0.002	0.42	1.34

نوع المان های قطعه کار، شش ضلعی مرتبه یک (C3D8R) بوده و تعداد المان های همگرا شده  $221242$  المان با اندازه مش  $0.5/$  میلی متر می باشد. در شکل ۱ نحوه مش بندی پین و قطعه کار نشان داده شده است.

شرایط مرزی اعمالی به شرح زیر می باشد:

- سطح پایینی قطعه کار از هر نوع حرکت مقید شده است.
- در فرایند برخورد، با توجه به تغییر شکل زیاد در ماده ی الاستیک-پلاستیک، ضریب اصطکاک بین پین و قطعه کار برابر  $0.25/$  در نظر گرفته شده است.
- سرعت اولیه پین ها  $2000\text{ mm/s}$  فقط در راستای عمود بر قطعه کار در نظر گرفته شده است.
- پین فقط در راستای عمود بر قطعه کار مجاز به حرکت است و حرکت آن در سایر راستاها مقید شده است.



شکل ۱ مش بندی پین و قطعه کار

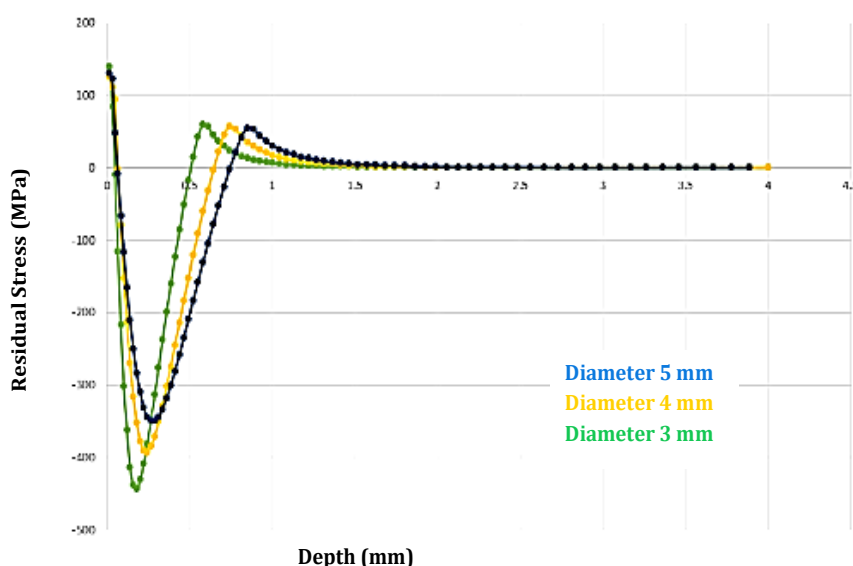
با توجه به ماهیت ضربه‌ای بودن این شبیه‌سازی نوع تحلیل به صورت دینامیکی صریح می‌باشد و زمان تحلیل با توجه به فاصله پین از قطعه کار، سرعت حرکت پین و زمان نفوذ  $0/00014$  ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی مربوط به این مقاله، هدف بررسی تنش‌های پسماند می‌باشد، لذا تحلیل در دو مرحله بارگذاری و باربرداری انجام گرفته است که مرحله بارگذاری شامل ضربه بین پین و قطعه کار می‌باشد و مرحله باربرداری صرفاً جهت مشخص شدن تنش‌های پسماند در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ ماتریس طراحی آزمایش برای هر یک از اجراها و نتایج به دست آمده از مدلسازی ارائه گردیده است.

جدول ۳ طراحی آزمایش و نتایج اندازه‌گیری تنش در مدلسازی

شماره آزمایش	متغیرها			تنش پسماند (MPa)	عمق تنش (mm)	
	شرایط آزمایش	دامنه نوسان ( $\mu\text{m}$ )	شعاع نوک پین (mm)			قطر پین (mm)
1		13	2	4	-402.768	0.24
2		11.5	2	4	-392.4	0.24
3		11.5	2	4	-393.418	0.2645
4		13	3	5	-410.205	0.2895
5		10	2	4	-375.782	0.22
6		11.5	3	4	-452.091	0.2
7		11.5	2	3	-443.151	0.18
8		10	3	3	-452.404	0.141
9		11.5	2	4	-397.418	0.24
10		13	1	3	-352.143	0.22
11		13	1	5	-278.778	0.39
12		11.5	2	5	-350.04	0.29678
13		10	3	5	-320.377	0.2445
14		11.5	2	4	-398.4	0.2445
15		11.5	1	4	-307.089	0.29
16		11.5	2	4	-388.418	0.24
17		11.5	2	4	-380.418	0.2440
18		13	3	3	-481.125	0.160775
19		10	1	5	-250.25	0.31
20		10	1	3	-351.954	0.2

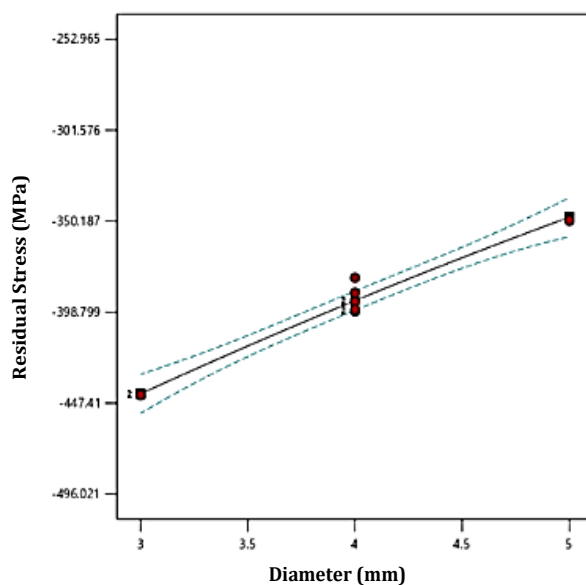
### ۳- نتایج و بحث

در مدل سازی اندازه قطر پین ها به ترتیب ۳، ۴ و ۵ میلی متر انتخاب شده است. نتایج تنش پسماند به دست آمده از این سه قطر در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ با افزایش قطر پین عمق نفوذ تنش افزایش و مقدار تنش پسماند بیشینه کاهش پیدا کرده است. دلیل این موضوع را می توان چنین بیان نمود که با افزایش قطر پین، جرم آن افزایش و در نتیجه انرژی برخورد افزایش یافته است. افزایش انرژی برخورد باعث به وجود آمدن ناحیه ی پلاستیک عمیق تر و عمق نفوذ تنش بیشتر شده است؛ اما در پین نازک تر به دلیل تمرکز انرژی بیشتر مقدار حداکثر تنش پسماند افزایش یافته است.



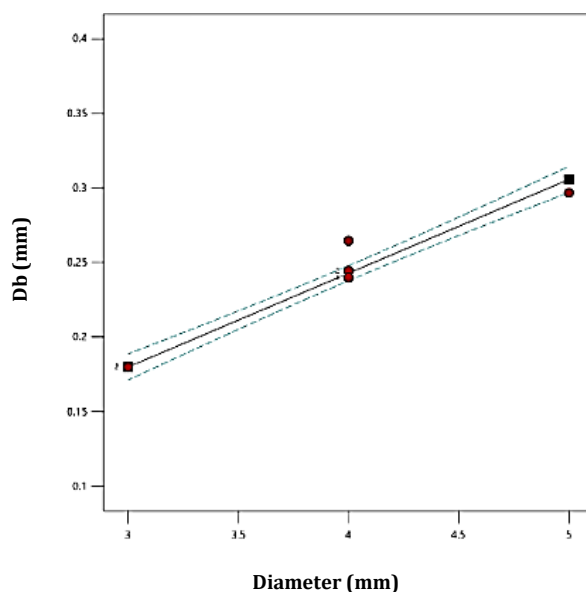
شکل ۲ تاثیر قطر پین بر توزیع تنش پسماند

با توجه به نتایج حاصل از مدل سازی و با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت نمودار تاثیر پارامتر قطر رسم شده است. شکل ۳ اثر قطر پین بر روی بیشترین تنش پسماند را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود پین با قطر ۳ میلی متر بیشترین تاثیر را در افزایش تنش پسماند فشاری داشته و با افزایش قطر پین میزان تنش پسماند کاهش یافته است.



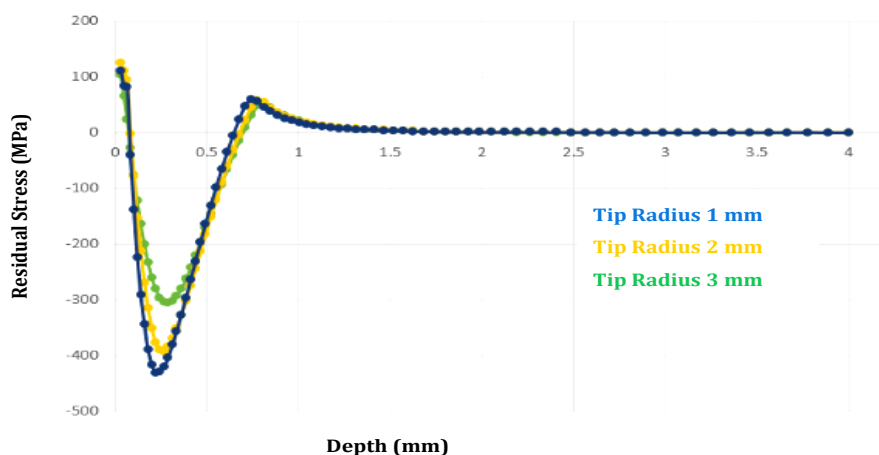
شکل ۳ نمودار به دست آمده از تاثیر قطر پین بر بیشینه تنش پسماند

در شکل ۴ تاثیر قطر پین بر عمق حداکثر تنش پسماند فشاری نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش قطر پین از ۳ به ۵ میلی متر مقدار عمق تنش پسماند از ۰/۱۷۹ میلی متر به ۰/۳۰۵ میلی متر افزایش یافته است.



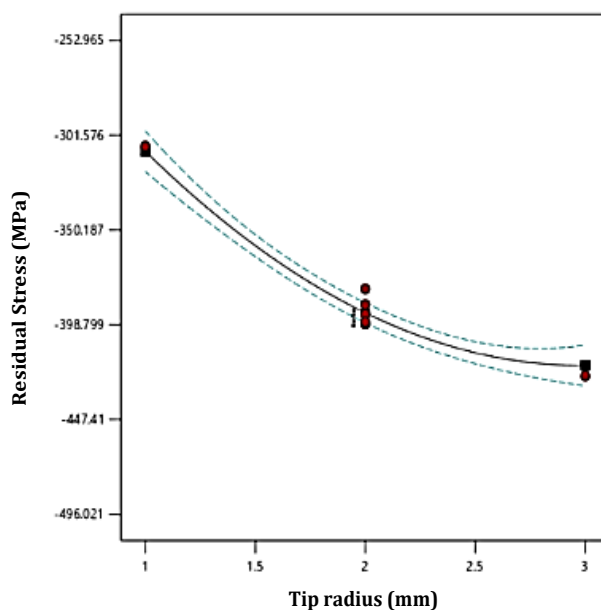
شکل ۴ تاثیر قطر پین بر عمق تنش پسماند فشاری

به منظور بررسی اثر شعاع نوک پین از سه شعاع ۱ و ۲ و ۳ میلی متر در شبیه سازی استفاده شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. توزیع تنش پسماند ناشی از آن ها در قطعه کار در شکل ۶ مشخص شده است.

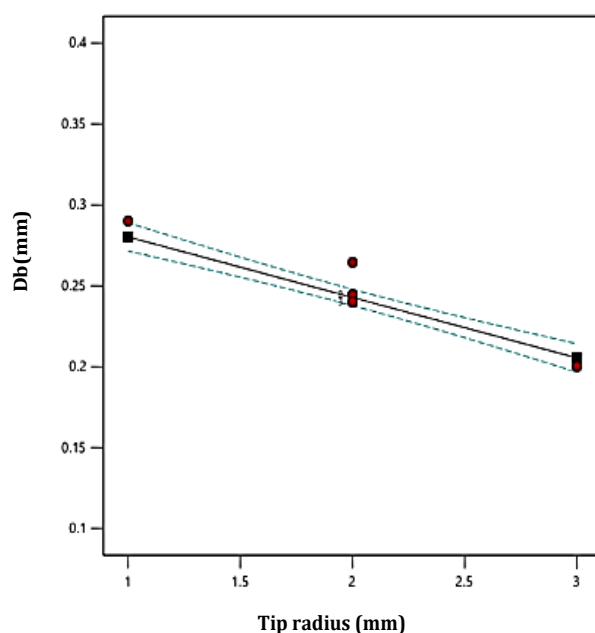


شکل ۵ تاثیر شعاع نوک پین بر توزیع تنش پسماند

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود با افزایش شعاع پین حداکثر تنش پسماند افزایش و عمق نفوذ تنش کاهش یافته است. دلیل این موضوع را می توان چنین بیان کرد که با افزایش شعاع نوک پین انرژی برخورد ناشی از ضربه پین به سطح به صورت متمرکزتر شده و در نتیجه نفوذ عمیق تر شده است. بنابر این هنگامی که شعاع کوچک است، شکل نفوذ پهن تر و کم عمق تر خواهد بود که تنش پسماند کوچکتر و عمق نفوذ بزرگتری نتیجه شده است. در شکل ۶ و ۷ اثر شعاع نوک پین به ترتیب بر روی بیشترین تنش پسماند فشاری و عمق نفوذ تنش نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود پین با شعاع نوک ۳ میلی متر با مقدار ۴۲۵/۰۹۱ مگاپاسکال بیشترین تاثیر را در افزایش تنش پسماند فشاری داشته است. با توجه به شکل ۷ مشاهده می شود با افزایش شعاع نوک ابزار عمق نفوذ تنش کاهش یافته است.

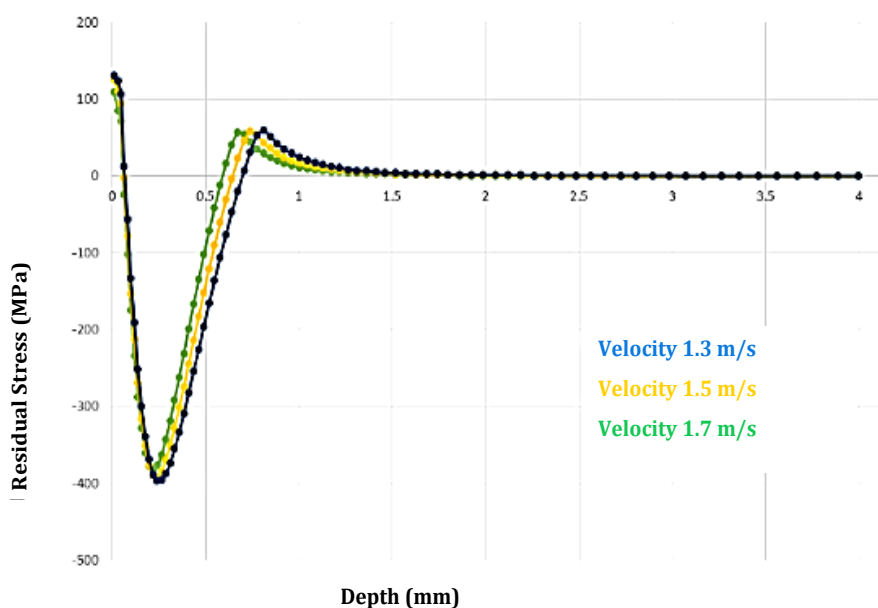


شکل ۶ تاثیر شعاع نیمه محور پین بر بیشینه تنش پسماند

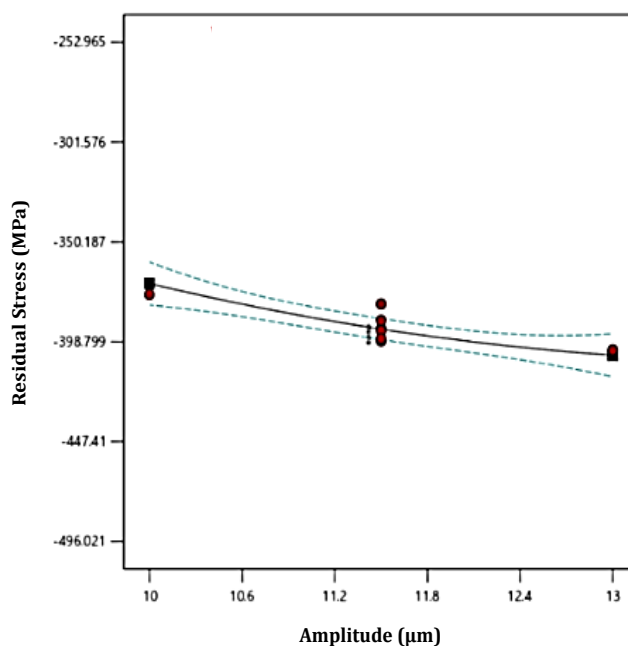


شکل ۷ تاثیر شعاع نوک پین بر عمق تنش پسماند

جهت بررسی اثر پارامتر دامنه نوسان بر تنش پسماند از اندازه‌های ۱۰، ۱۱/۵ و ۱۳ میکرومتر استفاده شده است. جهت وارد کردن مقادیر دامنه نوسان در نرم افزار آباکوس از مقدار سرعت جابجایی (نوسان) استفاده شده است. با توجه به فرکانس نوسان (۲۰۷۰۰ کلیو هرتز) مقدار سرعت نوسانی بیشینه برای دامنه‌های نوسان انتخاب شده برابر با ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ متر بر ثانیه شده است. در شکل ۸ اثر تغییر دامنه نوسان بر توزیع و مقدار تنش پسماند نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که اثر دامنه نوسان بر روی مقدار و عمق تنش پسماند قابل ملاحظه نبوده است. اگر چه مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه نوسان، عمق نفوذ تنش و حداکثر تنش پسماند افزایش یافته است. دلیل مشاهده تغییرات قابل ملاحظه مقدار کم تغییرات دامنه نوسان است. شکل‌های ۹ و ۱۰ اثر دامنه نوسان بر روی بیشترین تنش پسماند و عمق نفوذ تنش را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دامنه نوسان از ۱۰ میکرون به ۱۳ میکرون مقدار تنش پسماند فشاری و عمق نفوذ تنش افزایش یافته است.

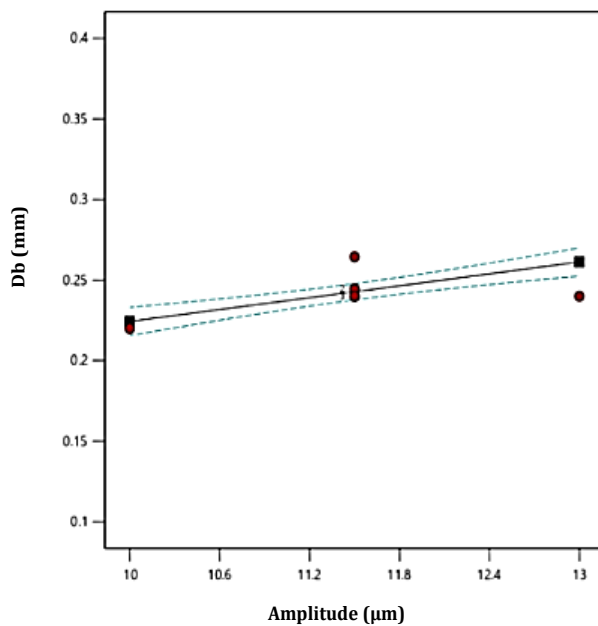


شکل ۸ تاثیر دامنه نوسان بر توزیع تنش پسماند

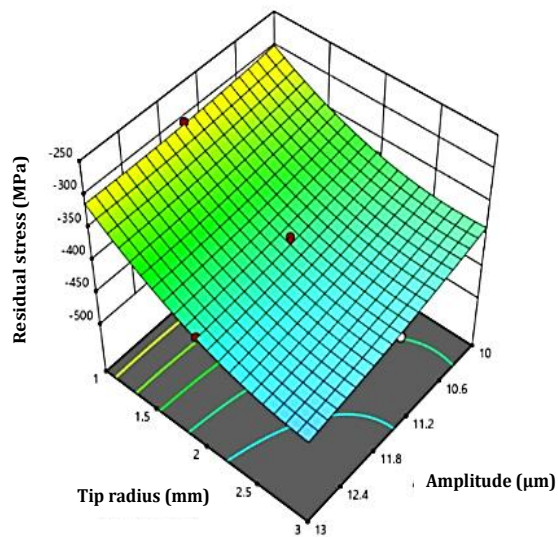


شکل ۹ تاثیر دامنه نوسان بر بیشینه تنش پسماند

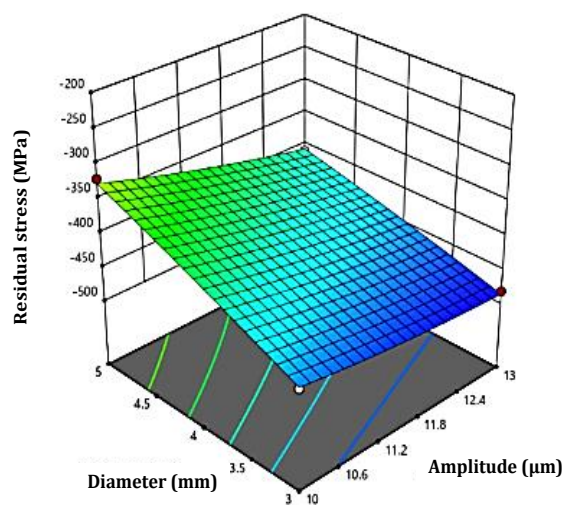
شکل ۱۱ اثر همزمان دامنه نوسان و شعاع نوک ابزار بر روی مقدار حداکثر تنش پسماند نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه نوسان و شعاع نوک پین مقدار حداکثر تنش پسماند فشاری افزایش یافته است. لذا در فرایند چکش کاری انتخاب دامنه نوسان و شعاع انحنا نوک پین بزرگ بیشترین تنش پسماند را ایجاد می‌کند. در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ اثر همزمان قطر پین-دامنه نوسان و قطر پین-شعاع نوک پین نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها با افزایش دامنه نوسان، قطر پین و شعاع نوک پین مقدار تنش پسماند فشاری افزایش یافته است. بنابراین برای اعمال بیشترین تنش پسماند فشاری در فرایند چکش کاری فراصوتی باید از دامنه نوسان، قطر پین و شعاع نوک پین بزرگ استفاده کرد.



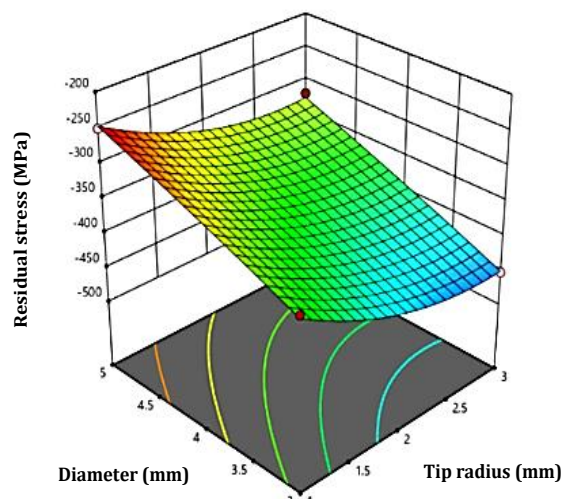
شکل ۱۰ تاثیر دامنه نوسان بر عمق تنش پسماند



شکل ۱۱ تاثیر همزمان دامنه نوسان و شعاع نوک پین بر تنش پسماند



شکل ۱۲ تاثیر همزمان دامنه نوسان و قطر پین بر تنش پسماند



شکل ۱۳ تاثیر همزمان شعاع نوک پین و قطر پین بر تنش پسماند

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر فرایند کوبش فراصوتی بر خواص سطحی آلیاژ آلومینیوم Al6061-T6 پرداخته شده است. جهت بررسی تاثیر هندسه پین بر میزان تنش باقیمانده و عمق تنش پسماند مدلسازی عددی با نرم افزار آباکوس انجام گردید نتایج به دست آمده به طور خلاصه به شرح ذیل است:

- با توجه به نتایج مدلسازی با افزایش دامنه نوسان، حداکثر تنش پسماند فشاری ۹۲/۲۵ درصد افزایش و عمق حداکثر تنش پسماند فشاری ۹۵ درصد افزایش یافت.
- در مدلسازی فرایند چکش کاری فراصوتی با افزایش قطر پین از ۳ میلی متر به ۵ میلی متر حداکثر تنش پسماند فشاری کاهش و عمق تنش افزایش یافت.
- با توجه به مدلسازی عددی افزایش شعاع نوک پین باعث افزایش تنش پسماند فشاری و کاهش عمق تنش گردیده است.

#### References

- [1] Mattox DM. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing. William Andrew; 2010 Apr 29.
- [2] Liu Y, Wang L, Wang D. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process. Journal of Materials Processing Technology. 2011 Dec 1;211(12):2106-13. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.009
- [3] Akbarzadeh B, Gorji H, Bakhshi M, Jamaati R, Mirnia MJ. Development of a new process for the severe plastic deformation of AA 1050 to improve the mechanical properties. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020 Jun 21;7(4):19-29. [In Persian]
- [4] Abdullah A, Pak A, Abedini A. Design and manufacture of ultrasonic hammer penning tool. Patent, Iran, 2009.
- [5] Sun L, Huang L, Wu P, Huang R, Fang N, Xu F, Xu K. Progress on the effect and mechanism of ultrasonic impact treatment on additive manufactured metal fabrications. Crystals. 2023 Jun 22;13(7):995. doi: 10.3390/cryst13070995
- [6] Li L, Kim M, Lee S, Kim J, Kim H, Lee D. Study on surface modification of aluminum 6061 by multiple ultrasonic impact treatments. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018 Apr;96:1255-64. doi: 10.1016/j.msea.2004.07.025
- [7] Statnikov S. Guide for application of ultrasonic impact treatment improving fatigue life of welded structures. International Institute of Welding. 1999;1757(99):1-7.
- [8] Zhu QF, Sun ZM, Ma TD, Klimenov VA, Borozna V, Zhu BH. Effect of ultrasonic surface peening on fatigue property of 7B04 high strength and toughness aluminum alloy. In Materials Science Forum 2010 Oct 1 (Vol. 654, pp. 1892-1895). Trans Tech Publications Ltd. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.1892
- [9] Zhang R, Li X, Liu Y, He C, Wang Q. Effect of ultrasonic peening treatment on VHCF behavior of friction stir welded joints in aluminum alloys. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 Oct 1 (Vol. 611, No. 1, p. 012011). IOP Publishing. doi: 10.30684/etj.v39i9.1725

- [10] Zhu L, Guan Y, Wang Z, Zheng H, Lin J, Zhai J, Xie Z. Influence of surface nanocrystallization and partial amorphization induced by ultrasonic shot peening on surface properties of 7075 aluminum alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020 Nov;29:7693-709. doi: [10.1007/s11665-020-05219-5](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05219-5)
- [11] Efe Y, Karademir I, Husem F, Maleki E, Karimbaev R, Amanov A, Unal O. Enhancement in microstructural and mechanical performance of AA7075 aluminum alloy via severe shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification. *Applied Surface Science*. 2020 Oct 30;528:146922. doi: [10.1016/j.apsusc.2020.146922](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146922)
- [12] Ding B, He M, Ma R, Xie L, Wang J, Zou S, Liu C. Influence of ultrasonic impact treatment on corrosion resistance of 7075 aluminum alloy welded joint. In *Journal of Physics: Conference Series* 2023 Aug 1 (Vol. 2578, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- [13] Mahmood AA, Kokz SA, Mohsen AM. The influence of ultrasonic impact peening (Uip) on the mechanical properties and fatigue life of the Aa1100 alloy. *Journal of Applied Engineering Science*. 2023 Mar 27;21(2):384-91. doi: [10.5937/jaes0-38125](https://doi.org/10.5937/jaes0-38125)
- [14] Samimi H, Pak A. Investigating the effect of the ultrasonic hammer peening on the wear properties of Aluminum alloy 6061. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Sep 23;10(7):26-35. [In Persian]
- [15] Akram S, Jaffery SH, Khan M, Fahad M, Mubashar A, Ali L. Numerical and experimental investigation of Johnson–Cook material models for aluminum (Al 6061-T6) alloy using orthogonal machining approach. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018 Sep;10(9):1687814018797794. doi: [10.1177/1687814018797794](https://doi.org/10.1177/1687814018797794)