

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدر س



بررسی تأثیر تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ و ماشین کاری بر اعوجاج قطعات جدارناز ک

سعید امینی¹*، سروش مسعودی²، قاسم امیریان³

1 - دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
2 - باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان
3 - استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
* کاشان، کد پستی 731751167، amini.s@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله چکیدہ مقاله يژوهشي کامل یکی از مشکلات اصلی در ماشین کاری قطعات جدار نازک از جنس آلیاژهای استحکام بالای آلومینیم، اعوجاج و نایایداری ابعادی قطعات بعد از دريافت: 03 تير 1394 ماشین کاری است که منجر به افزایش نرخ قطعات معیوب و افزایش هزینههای تولید می شود. در این مقاله رابطه تنش های پسماند ناشی از پذيرش: 30 شهريور 1394 کوئنچ و ماشین کاری قطعات، با میزان اعوجاج یک قطعه جدار نازک از جنس آلیاژ AI7075 مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، دو گروه ارائه در سایت: 14 آذر 1394 آزمایش انجام شده است. در مرحله اول به بررسی ارتباط تنشهای پسماند ناشی از فرایند کوئنچ با اعوجاج پرداخته شده است. با انجام آزمایش-كليد واژگان: های تجربی، اثر بخشی دو روش کوئنچ پلیمری و کوئنچ معکوس در کاهش تنشهای پسماند در مقایسه با کوئنچ در آب بررسی شده است و تنش پسماند رابطه سطح تنش ها با میزان اعوجاج بررسی شده است. در مرحله دوم با آزمایش هایی با شرایط مختلف ماشین کاری و اندازه گیری نیرو، حرارت و اعوجاج تنش پسماند در قطعات، تأثیر این پارامترها بر میزان اعوجاج قطعات بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان میدهد هر دو نوع تنش، در ماشين كارى ایجاد اعوجاج در قطعات مؤثر هستند و که می بایست با انتخاب استراتژی های مناسب تا حد امکان سطح این تنش ها را کاهش داد. كوئنچ قطعات جدار نازک آلياژ AI7075

Effect of machining and quench-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts

Saeid Amini^{1*}, Soroush Masoudi², Ghasem Amirian³

1- Manufacturing Department, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Young Researchers and Elite Club, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran

* P.O.B. 8731751167, Kashan, Iran, amini.s@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

ABSTRACT

Original Research Paper Received 24 June 2015 Accepted 21 September 2015 Available Online 05 December 2015

Keywords: Residual stress Distortion Machining Quenching Thin-walled part AL7075 The main problems in machining of thin-walled parts made of high-strength aluminum alloys are distortion and dimensional instability, which lead to an increase in distorted part and production costs. This article attempts to investigate the correlation between machining-induced and quench-induced residual stresses and the distortion of thin-walled parts made of AL7075 alloy. The experiments are carried out in two steps. In the first step, the effects of polymer and uphill quenching methods in comparison with water quenching in the reduction of residual stresses are investigated on an experimental basis. By conducting the machining tests, the effect of residual stress on distortion is investigated. In the second step, several experiments are carried out under different machining conditions. To study the effect of mechanical and thermal loads on the residual stresses and distortion, the machining force and temperature of cutting area are measured. Finally, the correlation between the machining-induced residual stress and distortion

نیست [1]. یکی از مشکلات اصلی در ماشینکاری قطعات جدار نازک،	1 - مقدمه
اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات بعد از ماشینکاری است که منجر به	در صنایع هوا فضا و خودروسازی به دلیل مسائلی مانند کاهش وزن کلی
افزایش نرخ قطعات معیوب و افزایش هزینههای تولید میشود. اعوجاج	سازهها، کاهش مصرف سوخت، کمبود فضا و غیره، طراحی و استفاده از
قطعات میتواند در گسترهای از چند میکرومتر در قطعات کوچک تا چندین	قطعات یکپارچه جداره نازک از جنس آلیاژهای آلومینیم که از ضریب
سانتیمتر در قطعات بزرگ قرار گیرد [2]. مهمترین عامل در اعوجاج قطعات	استحکام به وزن بالایی برخوردارند، رو به گسترش است. در ماشینکاری این
جدار نازک به ویژه قطعات از جنس آلیاژهای آلومینیم، تنشهای پسماند	گونه از قطعات، برادهبرداری حدود 98 درصد ماده خام اولیه دور از انتظار

Please cite this article using: S. Amini, S. Masoudi, Gh. Amirian, Effect of machining and quench-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 357-366, 2015 (in Persian)

موجود در قطعات است. این تنشها به علت بارهای مکانیکی و حرارتی اعمال شده بر قطعات در فرایندهای همچون کوئنچ، آهنگری، اکستروژن و همچنین فرایندهای ماشین کاری به وجود میآیند [3].

تنشهای ناشی از کوئنچ بهعلت گرادیان حرارتی بالا، از شدت و گستردگی بالایی برخوردارند. در فرایند کوئنچ هنگامی که قطعه با دمای بالا در آب به عنوان سیال کوئنچ غوطهور میشود، به علت گرادیان حرارتی ناشی از نرخ انتقال حرارت متفاوت در سطح و مرکز قطعه، نرخ انقباض در سطح بسیار بالاتر از مرکز قطعه است و سطح به سرعت سرد میشود. بعد از سرد شدن سریع سطح، استحکام تسلیم آن به شدت افزایش مییابد و به علت انقباض سریع، نواحی اطراف را به سمت خود میکشد که موجب تشکیل تنشهای پسماند فشاری در سطح میگردد. از طرف دیگر به دلیل استحکام در این نواحی است، این قسمتها توسط بخشهایی که دارای تنشهای فشاری هستند، تحت کشش قرار میگیرد که باعث به وجود آمدن تنشهای پسماند کششی در مرکز قطعات میشود [4].

کاهش شیب حرارتی مرکز تا سطح قطعه، عامل اصلی جهت کاهش سطح تنشهای پسماند ایجاد شد در فرایند کوئنچ است. یکی از روشهای مناسب برای کاهش گرادیان حراتی در فرایند کوئنچ استفاده از محلولهای پایه آب پلیمری مانند پلی آلکالین گلیکول¹ جهت بهبود خواص خنککاری سیالهای کوئنچ است. با ورود جسم داغ به یک محلول پایه آب پلیمری، پلیمرهای موجود در مایع در اثر گرمای جسم به صورت فیبر تغییر شکل می-دهند و سرتاسر قطعه را میپوشانند. لایه ایجاد شده به دور قطعه به عنوان عایق عمل میکند و موجب سرد شدن یکنواخت قطعه و کاهش سطح تنش های پسماند می گردد [5].

یکی دیگر از روشهای کارامد جهت کاهش سطح تنشهای در فرایند کوئنچ، استفاده از روش کوئنچ معکوس² است. در این روش پس از کوئنچ معمولی، قطعات در یک محیط با دمای بسیار پایین (2°20-) نگاه داشته میشوند و سپس در معرض حرارت بسیار بالا (2°200) قرار میگیرند. به عبارت دیگر، قطعه ابتدا گرم شده و سپس در محیط سرد قرار داده میشود (کوئنچ آب) و در مرحله بعد ابتدا سرد شده و سپس در محیط گرم قرار داده میشود (کوئنچ معکوس). فرایند کوئنچ معکوس باعث ایجاد تنشهایی با توزیع معکوس نسبت به کوئنچ معمولی میشود. این بدین معنی است که در سطح تنشهای کششی و در مرکز قطعه تنشهای فشاری ایجاد میشود که در نهایت موجب خنثی شدن تنشهای ناشی از کوئنچ آب و کاهش سطح تنشهای پسماند میشود [6].

گروه دیگر از فرایندهایی که باعث اعمال سطح بالایی از تنشهای پسماند در قطعات میشوند؛ فرایندهای ماشین کاری هستند. در این فرایندها، بارهای مکانیکی و حرارتی شدیدی به صورت همزمان بر سطح قطعه کار

وسیله بر همکنش تنشهای موجود در مواد خام و تنشهای ناشی از ماشین کاری ایجاد می شود که به عنوان عامل اصلی اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات عمل می کنند. در بسیاری از موارد، قطعات بعد از ماشین کاری در دامنه تلرانسهای ابعادی و هندسی مورد نظر قرار دارند اما با گذشت زمان و یا با نصب قطعه در محل مورد نظر، ابعاد و به ویژه تلرانسهای هندسی با تغییر و اعوجاح رو به رو می شوند [8].

در چند دهه اخیر، پژوهشهای فراوانی با استفاده از تحقیقات تجربی، مدل های المان محدود و تحلیلی و همچنین ترکیبی از آنها جهت بررسی و پیش-بینی تنشهای پسماند ناشی از عملیات حرارتی، فرایندهای تولید مواد و ماشین کاری در فلزات مختلف صورت گرفته است [10,9]. چاتلیان و همکارانش با انجام تحقیقات تجربی تأثیر تنشهای پسماند موجود در مواد اولیه بر اعوجاج قطعات بعد از ماشین کاری را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نحوه توزیع تنشهای پسماند در قطعات، بر میزان اعوجاج قطعات مؤثر است [11]. ژونگی و همکارانش با استفاده از یک مدل FEM تأثیر تنشهای اولیه و تنشهای ناشی از ماشین کاری را بر روی اعوجاج قطعات مدلسازی کردند. نتایج حاصل از مدل نشان داد که در قطعات جدار نازک تنشهای ناشی از ماشینکاری و در قطعات ضخيم تنشهاي اوليه عامل اصلي اعوجاج قطعات است [12]. روبينسون و همکارنش با انجام تحقیقات تجربی تأثیر برداشت قسمتی از مواد را بر روی اعوجاج و توزیع تنش یک قطعه کوئنچ شده بررسی کردند. نتایج بیانگر این بود که برداشت قسمتی از قطعه کوئنچ شده به وسیله ماشین کاری، موجب توزیع مجدد تنشها در قطعه کار می گردد و هیچ گونه آزاد سازی تنش صورت نمی-گیرد، چرا که شدت انرژی کرنش برای بلوکهای ماشین کاری شده و نشده برابر بوده است. همچنین آنها اعلام کردند که با افزایش میزان برداشت مواد، اعوجاج افزايش مييابد [13].

دنکنا و دیگر همکارانش با بررسی اثر شرایط ماشین کاری و هندسه ابزار بر تنشهای پسماند در فرزکاری آلیاژ AI7449، تأثیر مستقیم این پارامترها بر توزیع تنشهای پسماند ناشی از ماشین کاری را اثبات کردند. نتایج آنها نشان داد افزایش پیشروی و افزایش شعاع نوک ابزار موجب افزایش سطح تنشهای پسماند فشاری و افزایش عمق این تنشها می گردد [14]. دنکنا و دیگر همکارانش نشان دادند بارهای حرارتی و مکانیکی اعمال شده به قطعه کار در ماشین کاری قطعات جدار نازک، موجب تغییر شکل قابل توجهی در ساختار و ابعاد قطعه کار در حین ماشین کاری میشود [51]. نووانگ و دیگر همکارانش اعلام کردند که نیروهای ناشی از گیرهبندی قطعات میتوانند موجب تغییر شکل الاستیک قابل توجه قطعات جدار نازک در حین ماشین کاری گردد. این تغییر شکل موجب تغییر توزیع تنشهای پسماند و اعوجاج قطعات بعد از ماشین کاری میشود [61]. برینکسمایر با استفاده از یک مدل تحلیلی، پتانسیل اعوجاج قطعات استوانهای جدار نازک ماشین کاری شده را با توجه به پروفایل توزیع تنش آنها بررسی کرد. نتایج مدل نشان داد

که با افزایش سرعت برش و کاهش ضخامت قطعات پتانسیل اعوجاج قطعات
افزایش مییابد [17].
با وجود تمام تلاش های اشاره شده، تاکنون مکانیزم اعوجاح و تغییر
شکل قطعات جدارنازک به طور دقیق مشخص نشده است. همچنین شناخت
و پیش بینی توزیع تنشهای پسماند تنها به صورت کیفی امکان پذیر بوده
است و ابهامات زیادی در مورد علل و مکانیزم ایجاد تنشهای پسماند ناشی از
کوئنچ و ماشینکاری و تأثیر آنها بر اعوجاج وجود دارد. علاوه بر این در
تحقیقات گذشته کمتر به مطالعه همزمان اثر فرایندهای مختلف بر تنشهای
پسماند و اعوجاج پرداخته شده است و اغلب یک فرایند برررسی شده است.

اعمال میشود. بارهای مکانیکی اعمال شده از سوی ابزار، باعث تغییر شکل پلاستیک غیر یکنواخت در لایههای سطحی مواد گشته و در نهایت منجر به تشکیل تنشهای پسماند فشاری و یا کششی در سطح می گردد. همچنین حرارت بالای ایجاد شده در ناحیه برش که ناشی از تغییر شکل شدید و اصطکاک در این ناحیه است، باعث ایجاد یک گرادیان حرارتی و انبساط موضعی در سطح قطعات ماشین کاری شده می شود و عمدتا منجر به تشکیل تنشهای پسماند کششی می شود [7]. توزیع نهایی تنش در قطعات، به

1- Poly Alkylene Glycol 2- Uphill Quenching

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12



Fig. 1 The time-heat diagram of the quenching parts



شکل 1 دیاگرام زمان - حرارت سه گروه مختلف قطعات کوئنچ شده

Fig. 2 Final geometry of work piece

شکل 2 هندسه نهایی قطعه جدار نازک

جدول 1 سطوح مختلف در نظر گرفته شده برای هر پارامتر Table **1** The different levels considered for each parameter

واحد		سطح			پارامتر
-	4	3	2	1	
m/min	590	470	350	230	سرعت برش
mm/min	-	180	120	60	نرخ پیشروی
-	-	-	كاربيدى	PCD	جنس ابزار

هدف اصلی این تحقیق، بررسی همزمان تأثیر تنشهای پسماند ناشی از فرایندهای کوئنچ و ماشینکاری بر میزان اعوجاج قطعات جدار نازک ماشینکاری شده است تا فهم کاملی از تأثیر هر فرایند بر اعوجاج قطعات به دست آید. بنابراین در مرحله اول چند قطعه استوانهای با روشهای مختلف کوئنچ شدهاند و با اندازه گیری توزیع تنشهای پسماند اثر بخشی هر روش در کاهش تنشهای پسماند و اعوجاج مشخص شده است. در مرحله دوم به مطالعه تأثیر تنشهای پسماند ناشی از ماشینکاری بر اعوجاج قطعات پرداخته شده است.

2°25 کوئنچ شدهاند و در نهایت در دمای ۵°20 به مدت 24 ساعت تحت عملیات پیرسختی قرار گرفتهاند(عملیات حرارتی T6). تخمین زده می شود که عملیات پیر سختی موجب کاهش تقریبی 15 درصد در سطح تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ شود [18]. گروه دوم قطعات بعد از عملیات انحلال، در محلول پلیمری پلی آلکالین گلیکول نوع 1 مطابق با استاندارد3025 AMS کوئنچ شده و سپس تحت عملیات پیرسختی قرار گرفتهاند(شرایط انحلال و پیرسختی مشابه گروه اول بوده است). گروه سوم قطعات بعد از عملیات انحلال و کوئنچ در آب (شرایط مشابه گروه اول)، به مدت 30 دقیقه در محفظه نیتروژن مایع در گرفته و به مدت 80 ثانیه در معرض بخار آب با فشار 14 بار قرار گرفتهاند به طوری که دمای قطعات به ۵°90 رسیده است و سپس تحت عملیات پیرسختی قرار گرفتهاند. در شکل 1 دیاگرام زمان - حرارت سه گروه مختلف پیرسختی قرار گرفتهاند. در شکل 1 دیاگرام زمان - حرارت سه گروه مختلف قطعات نشان داده شده است. در مرحله بعد جهت بررسی تأثیر تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ بر اعوجاج قطعات ماشین کاری شده، آزمایشهای یکسان

2-2 - هندسه قطعه کار و شرایط ماشین کاری

در شکل 2 هندسه نهایی قطعه جدار نازک نشان داده شده است. قطعات جدار نازک از یک استوانه خام به ابعاد mm 60 در قطر و mm 60 طول در طی چند مرحله ماشین کاری شدهاند و به ابعاد نهایی رسیدهاند. آزمایشهای ماشین کاری به وسیله یک ماشین تراش CNC (مدل 50TC - ماشینسازی تبریز) انجام گرفته است. قطعات طی دو مرحله به ابعاد نهایی ماشین کاری شدهاند. در مرحله اول قطعات در طی چند مرحله تا قطر داخلی mm 55 و قطر خارجی mm 59 mm و به طول mm 59 ماشین کاری شدهاند (خشن کاری) و در انتهای قطعه یک رزوه داخلی به اندازه M56 جهت بستن قطعه کار در فیکسچر ایجاد شده است. در مرحله دوم (پرداخت کاری)، به منظور جلوگیری از اعمال فشار فکهای سه نظام بر روی قطعه کار و تغییر فرم آن، قطعه کار بر روی یک فیکسچر که درون سه نظام بسته شده است، پیچ شده است. با استفاده از این روش می توان اطمینان حاصل کرد که اعوجاج قطعات تنها ناشی از تنشهای پسماند ناشی از ماشین کاری است و فشار فکهای سه نظام موجب تغییر در توزیع تنشهای پسماند و تغییر شکل قطعات نشده است. در پرداخت کاری قطعه کار به ابعاد نهایی mm 58 در قطر خارجی و mm 55 در قطر داخلی رسیده است.

3-2 - طراحی آزمایشهای ماشینکاری

به منظور بررسی اثر شرایط مختلف ماشینکاری بر اعوجاج و تنش پسماند، 24 آزمایش مختلف طراحی شد. در این آزمایشها سرعت برش، نرخ پیشروی و جنس ابزار به عنوان پارامترهای وردودی در نظر گرفته شدهاند. در طی

آزمایشها، نیروی ماشینکاری و حرارت ناحیه برش اندازه گیری شده است تا	2- شرایط و روند آزمایشها
رابطه این دو خروجی فرایند با تنشهای پسماند و اعوجاج بررسی گردد.	2-1 - طراحی آزمایشهای کوئنچ
جدول 1 سطوح مختلف در نظر گرفته شده برای هر پارامتر را نمایش	به منظور بررسی اثر بخشی دو روش کوئنچ پلیمری و کوئنچ معکوس در
میدهد. برای پارامترهای سرعت برش و نرخ پیشروی، به ترتیب چهار و سه	کاهش تنشهای پسماند در مقایسه با روش کوئنچ آب، چندین آزمایش
سطح در نظر گرفته شده است که گسترهای از کمترین تا بیشترین سرعت	مختلف بر روی 120 قطعهکار استوانهای با قطر و طولmm 60 از جنس
برش و پیشروی قابل انتخاب بر روی ماشین است تا اثر بهترین و بدترین	Al7075- T6 انجام گرفت. قطعات به سه گروه 4 تایی تقسیم شده و بر روی
شرایط ماشین کاری بر اعوجاج قطعات مشخص شود.	هر گروه آزمایشهای با شرایط متفاوتی انجام شده است.
به منظور اطمینان از اینکه تنشهای اندازهگیری شده در مراحل بعد،	گروه اول قطعات ابتدا به مدت 20 دقیقه در دمای C°470 جهت عملیات
تنها ناشی از شرایط ماشینکاری باشند، کلیه 24 قطعه مورد بررسی بعد از	انحلال در کوره حرارت داده شدهاند. سپس قطعات در یک محفظه آب با دمای

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

عملیات خشن تراشی، تنش زدایی شده اند و مرحله پرداخت قطعات با شرایط ذکر شده در جدول 1 انجام گرفته است. مرحله خشنکاری با استفاده از ابزار جنس کاربیدی (-VCGX160404-AL) و در سرعت برش m/min 470 و نرخ پیشروی 120mm/min و عمق 2 mm انجام گرفته است.

2-4 **- اندازهگیری نیرو و حرارت**

در طی آزمایشها، نیروی ماشین کاری و حرارت ناحیه برش اندازه گیری شده است. نیروی برش با استفاده از یک سیستم اندازه گیری نیرو شامل یک دینامومتر (مدل B9257 ساخت شرکت کیستلر)، یک تقویت کننده چند کاناله و سیستم کسب دادههای کامپیوتری، اندازه گیری شده است دینامومتر بر روی تارت دستگاه و در زیر هولدر نصب شده است.

برای اندازه گیری حرارت از یک دوربین مادون قرمز حرارتی (مدل DL700 مساخت شرکت دالی) استفاده شده است که دارای محدوده طیفی μm 14-8 μm رزولوشن گرمایی C¹C و نرخ فریم 50 تا Hz 60 است. دتکتور دوربین در یک دمای کنترل شده با استفاده از یک بلک بادی (مدل BBS 200- ساخت شرکت اپتیکوس) با ضریب گسیل 0.994 که مستقل از طول موج است، کالیبره شده است. در اندازه گیریها، هدف اندازه گیری ماکزیمم حرارت براده بوده است. در شکل 3 چیدمان تجهیزات جهت اندازه گیری نیرو و حرارت بر وی ماشین CNC نشان داده شده است.

5-2- اندازه گیریاعوجاج قطعات

به منظور بررسی میزان اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات ماشین کاری شده، با استفاده از یک ماشین اندازه گیری فرم در مقاطع مختلف قطعات تلرانس های هندسی بلافاصله پس از پایان ماشین کاری و یک هفته بعد اندازه گیری شدهاند. در طی یک هفته زمان بین دو اندازه گیری، قطعات در محیط آزمایشگاه و با شرایط استاندارد (دمای ²⁰°C و رطوبت 50%) نگهداری شده اند. به منظور اندازه گیری دقیق اعوجاج، در 5 مقطع از محیط بیرونی قطعه کار تلرانس دایرهای بودن اندازه گیری شده است. همچنین در طول قطعات در سه راستا با اختلاف 120 درجه، تلرانس مستقیم بودن اندازه گیری شده است. مجموع اختلاف تلرانس های هندسی در دو زمان اندازه گیری شده به عنوان اعوجاج قطعات در نظر گرفته شده است. بر روی تمامی قطعات و گیره ماشین اندازه گیری، یک شاخص موقعیت ایجاد شده است تا در زمان دوم اندازه-گیری قطعات دقیقا در موقعیت اندازه گیری اولیه بسته شوند. این موضوع به ویژه در اندازه گیری مجدد تلرانس مستقیم بودن از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که پراب دستگاه می بایست دقیقا در محل اندازه گیری اولیه قرار گیرد. در شکل 4 نحوه قرارگیری قطعه کار در ماشین و همچنین موقعیت تلرانسهای اندازه گیری شده نشان داده شده است.



2-6**- اندازهگیری تنش پسماند**

تنشهای پسماند نمی توانند به طور مستقیم اندازه گیری شوند و تنها تأثیرات آنها می تواند مشاهده و اندازه گیری شود. این تغییرات شامل کرنش، جابه-جایی و ایجاد تغییرات در ساختار مواد است و با توجه به میزان و شدت این تأثیرات مقدار و توزیع تنشهای پسماند تخمین زده می شود [19]. تنشهای ناشی از کوئنچ و ماشین کاری دارای ماهیت متفاوتی هستند. تنشهای ناشی از ماشین کاری حداکثر تا عمق 0.2mm زیر سطح ماشین کاری تشکیل می-شوند در صورتی که تنشهای ناشی از کوئنچ در سرتاسر مقطع قطعه کار به وجود می آیند. بنابراین می بایست از روشهایی با قابلیتهای مختلف برای اندازه گیری این تنشها استفاده کرد.

به منظور اندازه گیری تنش های ناشی از ماشین کاری از روش اندازه گیری پراش اشعه ایکس¹ استفاده شده است. در اندازه گیری ها با استفاده از اشعه Co-Ka خط تداخل از صفحه کریستالی {1 3 3} آلومینیم تحت هفت زاویه (Co-Ka درجه) و زوایای 20 بین 144 و 154 درجه، اندازه گیری شده است. سپس تنش های پسماند در راستای سرعت برش با استفاده از روش ¥sin2 اندازه گیری شدهاند. برای افزایش عمق اندازه گیری به وسیله روش الکتروپولیش یک دایره به قطر mm 5 لایه برداری شده است و سپس اندازه گیری در عمق مورد نظر انجام شده است. در شکل 5 اندازه گیری تنش پسماند در استوانه جدارنازک با استفاده از روش اندازه گیری پراش اشعه



Fig. **4** Measurement of distortion in the work piece by the form measurement machine

شکل 4 اندازه گیری تلرانس های هندسی قطعه کار بر روی ماشین اندازه گیری فرم





Fig. **5** Measurement of residual stress in the parts by X-ray method x-ray اندازه گیری تنشرهای ناشی از ماشین کاری در دستگاه Dynamometer Camera Tool Work Piece

Fig. 3 The experimental set-up

شکل 3 چیدمان تجهیزات برای اندازه گیری نیرو و حرارت

1-X-ray Method

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

همچنین برای اندازه گیری تنشهای ناشی از کوئنچ، از روش کانتور¹ استفاده شده است. روش کانتور یک روش مخرب برای اندازه گیری تنش پسماند میباشد که قادر است میزان و نحوه توزیع تنشهای پسماند را در کل مقطع قطعه کار مشخص نماید.

در این روش قطعه کار به دو نیمه برش داده میشود. توزیع مجدد تنشهای پسماند موجود در قطعه بعد از برش، موجب کرنش و تغییر شکل سطح برش داده شده میشود. بنابراین با اندازه گیری تغییر شکل و کرنش سطح برش و به دست آوردن کانتور سطح و سپس استفاده از قانون بیکنر²، میتوان میزان و توزیع تنشهای پسماند را محاسبه کرد. اندازه گیری سطح تنشهای پسماند به وسیله روش کانتور شامل چهار مرحله بوده که در ادامه تشریح شده است:

1- برش نمونه: مناسب ترین فرایند برای برش قطعات در این روش، فرایندی است که یک برش بسیار دقیق و مستقیم ایجاد نماید و موجب تغییر شکل موضعی شدید، شوکهای حراتی و اعمال تنش پسماند در سطح برش نگردد. مناسبترین روش برای برآورده شدن شرایط بالا، فرایند تخلیه الکتریکی با سیم (وایر کات) است. در این روش ابزار سیم مسی، بدون تماس با قطعه کار و با استفاده از جرقه مواد را برش میدهد. این ویژگی باعث میشود در حین فرایند برش، کمترین میزان تنش پسماند در سطح اعمال شود و یک سطح با تختی و زبری سطح مناسب به دست آید. در زمان برش قطعه کار، به منظور جلوگیری از تغییر شکل سطوح دیگر (کلیه سطوح به غیر از سطح برش) دو بخش قطعه کار در یک فیکسچر مناسب بسته شده است. قبل از برش، فیکسچر و قطعه کار درون محفظه سیال دیالکتریک (آب دیونیزه) دستگاه تخلیه الکتریکی قرار گرفتهاند تا کل مجموعه فیکسچر و قطعهکار به تعادل حرارتی برسند.

2- اندازه گیری کانتور سطح برش داده شده: بعد از اتمام برش ، دو نیمه قطعه کار از درون فیکسچر خارج شده و کانتور سطح برش دو نیمه به وسیله قطعه کار از درون فیکسچر خارج شده و کانتور سطح برش دو نیمه به وسیله یک ماشین ³CMM اندازه گیری شده است. همچنین با اندازه گیری زبری سطح برش داده شده، زبری سطح از کانتور اندازه گیری شده، فیلتر شده است. دعلح برش داده شده، زبری سطح از کانتور اندازه گیری شده، فیلتر شده است. دقطه به سطح برش داده شده، زبری سطح از کانتور اندازه گیری شده، فیلتر شده است. مطح برش داده شده، زبری سطح از کانتور اندازه گیری شده، فیلتر شده است. مطح برش داده شده، زبری سطح از کانتور اندازه گیری شده، فیلتر شده است. مطح برش داده شده، زبری سطح برش داده شده، زبری سطح از کانتور اندازه گیری شده، فیلتر شده است. قطعه کانتورهای اندازه گیری شده میانگین یابی شدهاند. میانگین یابی کانتور دو قطعه کانتورهای اندازه گیری شده میانگین یابی شدهاند. میانگین یابی کانتور دو قطعه کار اصلاح گردد. تحلیل نتایج و ایجاد کانتور از ابر نقاط به دست آمده توسط نرم افزار متلب انجام گرفته است.

4- تحلیل المان محدود جهت محاسبه توزیع تنشهای پسماند: به منظور مشخص نمودن توزیع تنشهای پسماند با توجه به کانتور به دست آمده در مراحل قبل، از یک مدل المان محدود خطی در نرمافزار آباکوس استفاده شده است. با مدل قطعه کار در نرم افزار، عکس کانتور اندازه گیری شده به عنوان شرایط مرزی جابه جایی به المانهای سطحی که به عنوان سطح برش در نظر گرفته شده است اعمال شده است. سپس با استفاده از قانون بیکنر، توزیع



Fig. 6 The Contour of residual stress distribution in the quenched parts **شکل** 6 کانتور توزیع تنش پسماند به دست آمده از روش کانتور در سه قطعه کوئنچ شده با شرایط مختلف





Fig. 7 Residual stress distribution in axial and radial directions in the quenched parts

شکل 7 نمودار توزیع تنش در دو راستای محوری و شعاعی سه قطعه کوئنچ شده

تنش پسماند در مقطع برش داده شده به دست آمده است.

3 **- نتايج**

1-3 - اثر بخشی روشهای کوئنچ معکوس و پلیمری در کاهش تنشهای پسماند در شکل 6 کانتور توزیع تنش پسماند به دست آمده از روش کانتور در سه قطعه کوئنچ شده با شرایط مختلف نشان داده شده است و در شکل 7 نمودار توزیع تنش در دو راستای محوری و شعاعی هر سه قطعه نمایش داده شده است.

1- Contour Method 2- Bueckner's principle

3- Coordinate measuring machine

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12



شکل 8 میانگین میزان اعوجاج قطعات سه قطعه کوئنچ شده

در قطعه کوئنچ شده در آب، گرادیان حرارتی شدید ایجاد شده در سطح و مرکز قطعه، موجب شکل گیری سطح بالایی از تنشهای فشاری در سطح و کششی در مرکز قطعه شده است به طوری که مقدار این تنشها در نواحی سطحی به MPa 230- و در نواحی مرکزی به MPa 100 نیز رسیده است. با بررسی شکل 7 که نمودار توزیع تنش را در دو راستای محوری و شعاعی را نمایش میدهد، میتوان مشاهده کرد که در هر دو راستا، در سطح قطعات، تنشهای فشاری و در مرکز تنشهای کششی ایجاد شده است. همچنین در هر دو راستا، میزان تنشهای کششی در مرکز قطعه کار نزدیک به هم بوده است اما میزان تنشهای فشاری تفاوت چشمگیری داشته است.

در راستای شعاعی علاوه بر اینکه سطح تنشها فشاری بسیار بالاتر از راستای محوری بوده است، تنشها در دو سمت قطعه نیز توزیع غیر یکنواختی داشتهاند. به طور مثال در قطعه کوئنچ شده در آب در راستای محوری، توزیع تنشهای فشاری، در هر دو سطح قطعه کار یکسان بوده است و تنشهایی به بزرگی MPa 60-در این قسمتها ایجاد شده است. در راستای شعاعی، تنشهای فشاری در دو سمت قطعه کار توزیع غیر یکنواختی دارند به طوری که در یک سمت سطح تنشها به MPa 150- و در سمت دیگر تا -معوری که در یک سمت سطح تنشها به MPa - و در سمت دیگر تا -راستا، به خوبی تأثیر هندسه قطعات بر توزیع تنشهای پسماند و همچنین گرادیان حرارتی متفاوت در قسمت های مختلف قطعات کوئنچ شده را نشان میدهد.

در قطعه کوئنچ شده در محلول پلیمری نیز، در سطح، تنشهای فشاری و در مرکز قطعات تنش کششی ایجاد شده است. با این وجود در این قطعه میزان تنشها به طور قابل توجهی نسبت به قطعه کوئنچ شده در آب، کاهش یافته است. کاهش سطح تنشهای پسماند در قطعه کوئنچ شده در محلول پلیمری نسبت به قطعه کوئنچ شده آب، به مکانیزم متفاوت کوئنچ آب و کوئنچ پلیمری مرتبط است. در کوئنچ آب، با ورود قطعه داغ در آب، یک فیلم بخار سرتاسر قطعه را میپوشاند که به عنوان عایق عمل کرده و نرخ انتقال حرارت پایینی دارد. با کمتر شدن دمای قطعه، فیلم بخار از بین رفته و سطح قطعه کار در تماس مستقیم با آب قرار می گیرد که موجب جوشش آب می-شود. در این مرحله به علت نرخ انتقال حرارت تقریبا 100 برابری نسبت به مرحله اول (تشکیل فیلم بخار)، دمای قطعه کار به شدت کاهش مییابد. زمانی که دمای قطعه کار به کمتر از دمای جوش آب رسید، مرحله جوشش

نرخ انتقال حرارت بسیار کمتری در مقایسه با مرحله جوشش دارد. نرخ خنک شوندگی متفاوت در این سه مرحله، موجب گرادیان حرارتی غیر یکنواخت در قطعه کار شده که منجر به تشکیل سطح بالایی از تنشهای پسماند با توزیع غیر یکنواخت میشود. همچنین ممکن است در آن واحد این سه مرحله در قسمتهای مختلف قطعه کار وجود داشته باشند که موجب ایجاد گرادیان-های حرارتی متفاوت در قسمتهای مختلف شده و منجر به افزایش سطح تنشهای پسماند و توزیع غیر یکنواخت آنها میشود.

از طرف دیگر در کوئنچ پلیمری، حرارت بالای قطعه موجب انحلال پلیمرهای موجود در سیال و ایجاد یک فیلم پلیمر به دور قطعه می گردد. فیلم ایجاد شده به عنوان یک عایق عمل کرده و موجب نرخ خنک شوندگی کاملا یکنواخت و کاهش گرادیان حرارتی در سطح و مرکز قطعه کار می شود که موجب کاهش قابل توجهی در سطح تنشهای پسماند می شود.

با بررسی کانتور و نمودار توزیع تنش قطعه کوئنچ معکوس در شکلهای 6 و 7 به خوبی مشخص است که در این روش نیز سطح تنشهای پسماند در مقایسه با کوئنچ آب کاهش یافته است. با این وجود توزیع تنش در دو جهت محوری و شعاعی، در سطح فشاری و در مرکز قطعه کششی بوده است که برخلاف تئورىها و نتايج ارائه شده توسط محققان ديگر بوده است. بر اساس نتایج ارائه شده در پژوهشهای انجام گرفته در قبل، در قطعات کوئنچ معکوس شده، تنشها در سرتاسر قطعه کار دارای توزیع تقریبا یکنواخت و نزدیک به صفرمی گردد [21,20]. عدم دستیابی به سطح مورد انتظار در کاهش تنشها در روش کوئنچ معکوس، مرتبط با ماهیت بسیار سخت اجرای این فرایند است که نیاز به کنترل بسیار دقیق حرارت قطعات در مراحل غوطهوری در نیتروژن و بخاردهی دارد. مرحله بخاردهی، به دلیل نیاز به فیکسچرهای مناسب که در تمام سطوح قطعه کار حرارت یکسانی را اعمال کند، بسیار پرهزینه بوده و با محدودیت های فراوانی همراه است. میزان کاهش تنشها در روش کوئنچ معکوس در این تحقیق، بسیار نزدیک به روش كوئنچ پليمري بوده است. با اين وجود انجام روش كوئنچ پليمري بسيار ساده و آسان است و در مقایسه با روش کوئنچ معکوس نیاز به تجهیزات گران قیمت جهت غوطه وری در نیتروژن و بخاردهی قطعات ندارد. همچنین زمان فرايند كوئنچ پليمرى بسيار كوتاهتر از كوئنچ معكوس است. مقايسه نمودار های تنش در شکل 7 نشان میدهد که قطعه کوئنچ شده در پلیمر به دلیل گردایان حرارتی یکنواخت، توزیع تنش یکنواخت تری نسبت به روش کوئنچ معكوس داشته است.

2-3- رابطه تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ و اعوجاج قطعات

بعد از کوئنچ قطعات، جهت بررسی تأثیر میزان و توزیع تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ با اعوجاج قطعات جدار نازک، با شرایط ماشینکاری اشاره شده در قبل سه قطعه جدار نازک تولید شد. برای اطمینان از صحت نتایج،

هر آزمایش 3 با تکرار شده است. بعد از انجام آزمایشها اعوجاج در کلیه قطعات اندازه گیری شده است. در شکل 8، میانگین میزان اعوجاج سه قطعه کوئنچ شده نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل 2 مشاهده می شود، جداره باقیمانده پس از ماشین کاری در فواصل 2 تا mm 5 و همچنین 55 تا mm 58 از قطعه خام قرار می گیرد. مطابق با شکل 7، در هر دو سوی جداره در این نواحی میزان تنش پسماند در قطعه کوئنچ شده در آب نسبت به قطعات کوئنچ معکوس و کوئنچ پلیمری بیشتر بوده است که در نهایت منجر به اعوجاج بیشتر در قطعه کوئنچ شده در آب شده است. مجموع میزان اعوجاج در مقاطع مختلف قطعه

1- Conduction

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

بررسی تأثیر تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ و ماشین کاری بر اعوجاج قطعات جدارناز ک

کوئنچ شده در آب به117.25μm رسیده است. این در حالی است که در قطعات کوئنچ پلیمری و کوئنچ معکوس، میزان اعوجاج ثبت شده تا حدود یک سوم قطعه کوئنچ شده درآب کاهش یافته است و به ترتیب میزان اعوجاج 36.17 و 44.72μm برای آنها ثبت گردیده است. نتایج به دست آمده رابطه مستقیم تنش پسماند با اعوجاج را نشان می دهد.

در توجیه این نتایج میتوان گفت با توجه به این که تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ ماهیت خود تعادلی دارند، پس از فرایند کوئنچ با ایجاد تغییر شکل پلاستیک قطعات، سطح تنشهای پسماند کششی و فشاری یکسان شده و قطعه به لحاظ نیروهای داخلی به تعادل میرسند. با ماشین کاری قطعات به ابعاد نهایی، در حدود 90 درصد مواد برداشته شده است که موجب عدم تعادل تنشهای موجود در قطعات می گردد. این عدم تعادل موجب تغییر شکل پلاستیک و اعوجاج قطعات تا ایجاد تعادل مجدد بین تنشهای کششی و فشاری میشود. با توجه به نتایج به دست آمده میتوان نتیجه گرفت که به هر میزان که سطح تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ بیشتر باشد، میزان عدم تعادل تنش بعد از ماشین کاری بیشتر شده و در نتیجه میزان اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات افزایش می یابد.

3-3- تأثیر حرارت و نیرو بر اعوجاج در آزمایشهای ماشینکاری

با توجه به طراحی آزمایشهای انجام شده، 24 قطعه جدار نازک با شرایط مختلف ماشین کاری تولید گردید و نیرو، حرارت و اعوجاج در کلیه قطعات اندازه گیری شد. در شکلهای 9 و 10 به ترتیب نمودار نیرو- اعوجاج و حرارت–اعوجاج با استفاده از نمودارهای دو ستونه نمایش داده شده است. در هر دو نمودار، نیرو و حرارتهای به دست آمده در 24 آزمایش انجام شده، به ترتیب از کمترین به بیشترین با استفاده از نمودار ستونی نمایش داده شده است.

همچنین میزان اعوجاج ثبت شده در هر آزمایش نیز با استفاده از یک نمودار خطی نشان داده شده است.



نتایج ثبت شده در شکل 9 نشانگر این است که با افزایش نیروی ماشین کاری، میزان اعوجاج قطعات با وجود نوسانات، از یک روند افزایشی برخوردار بوده است. با این وجود، همانگونه که در شکل 10 مشاهده می شود، اعوجاج اندازه-گیری شده در قطعات با افزایش حرارت نوسانات شدیدی داشته است. در عین حال شیب افزایش اعوجاج قطعات نسبت به افزایش حرارات، از یک روند افزایشی برخوردار بوده است.

نوسانات بالای میزان اعوجاج نسبت به افزایش حرارت، مرتبط با میزان نیروهای ثبت شده در هر آزمایش میباشد. به طور مثال در دو آزمایش مختلف، حرارت یکسان (**0.5±)**℃108 اندازه گیری شده است (موارد 4 و 5 در شکل 10). با این وجود، میزان اعوجاج این دو قطعه با توجه به نیروهای ثبت شده در هر آزمایش متفاوت بوده است و با افزایش نیرو ماشین کاری، میزان اعوجاج افزایش یافته است. به عبارت دیگر در نمودار حرارت– اعوجاج با تغییر نیرو در آزمایشهای که حرارت مشابهی داشتهاند میزان اعوجاج قطعات تغییر کرده و منجر به افزایش نوسان شدید نمودار شده است. این نوسانات در نمودار نيرو–اعوجاج كمتر است چرا كه افزايش نيروها نسبت به تغيير حرارت تأثیر بیشتری بر اعوجاج داشته است.

نتایج به دست آمده نشانگر تأثیر مستقیم نیرو و حرارت بر میزان اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات است. با این وجود، میتوان گفت نیروهای ماشین کاری نسبت به حرارت تأثیر بیشتری بر ایجاد اعوجاج در قطعات جدار نازک دارند. میزان اعوجاج قطعاتی که با استفاده از ابزار PCD ماشین کاری شدهاند به علت اینکه در طی ماشین کاری، بارهای حرارتی و مکانیکی کمتری به آنها وارد شده است پایین تر از گروه دیگر قطعات بوده است. بنابراین می توان با استفاده از ابزار های PCD، از سرعت برش و نرخ پیشروی بالاتر استفاده نمود که موجب افزایش راندمان تولید و کاهش پتانسیل اعوجاج مىشود.

در مرحله بعد به منظور بررسی ارتباط توزیع تنشهای پسماند ناشی از ماشین کاری با اعوجاج به وجود آمده در قطعات، از میان 24 قطعه تولید شده، چندین قطعه انتخاب شده و با استفاده از روش x-ray توزیع تنش در آنها اندازه گیری شده است. تنش در قطعاتی اندازه گیری شده که در طی آزمایشها کمترین و بیشترین نیرو، حرارت و اعوجاج در آنها اندازه گیری شده است. جدول 2 شرایط قطعات انتخاب شده برای اندازه گیری تنش را نمایش میدهد. با توجه به نتایج موجود در جدول 2، در آزمایشی که بیشترین نیروی ماشین کاری ثبت شده است، بیشترین میزان اعوجاج نیز اندازه گیری شده است که بیانگر تأثیر مستقیم نیروی وارد بر قطعه کار، بر میزان اعوجاج است. همچنین در قطعهای کمترین میزان اعوجاج در آن اندازه گیری شده است هر چند که دارای کمترین نیروی ثبت شده در آزمایشها نبوده است، با این وجود نیروی ثبت شده پایین بوده و نزدیک به کمترین نیروی اندازه گیری

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12



Fig. 11 Distribution of residual stresses in tangential direction in the parts **شکل** 11 توزیع تنشهای پسماند جهت مماسی در پنج قطعه اندازه *گ*یری شده



A Fig. 12 Transfer of some part of generated temperature to the machined surface and generating a thermal gradient شکل 12 انتقال بخشی از حرارت ایجاد شده در ناحیه برش به سطح ماشین کاری شده و ایجاد یک گرادیان حرارتی در یک مقطع از قطعه کار

در شکل 11 نمودار توزیع تنشهای پسماند در جهت مماسی (در راستای سرعت برش) در پنج قطعه اندازه گیری شده نمایش داده شده است. در این شکل با مقایسه نمودارهای توزیع تنش پسماند در آزمایش هایی که کمترین و بیشترین نیرو در آنها ثبت شده است به خوبی میتوان نتیجه گرفت که با افزایش نیرو، سطح تنش ها به شدت افزایش یافته است. در هردو نمودار شماره 1,2 (کمترین و بیشترین نیرو) کلیه تنش های اندازه گیری شده، از نوع فشاری بودهاند. نتایج نشان می دهد که با افزایش نیرو و به طبع آن افزایش فشار و تغییر شکل پلاستیک در لایه های سطحی موجب افزایش مقدار و مقار و تغییر شکل پلاستیک در لایه های سطحی موجب افزایش مقدار و مقدار و حرارت موه است در نمودار شماره 5 که مربوط به قطعهای است که کمترین میزان اعوجاج در آن ایجاد شده است، به علت نیرو و حرارت پایین در حین ماشین کاری، تنش ها از سطح پایینی برخوردار بودهاند. با

نتایج به خوبی نشان میدهد که میزان نیرو و حرارت به طور مستقیم بر میزان و نحوه توزیع تنشهای پسماند تأثیر گذار است.

توزیع متفاوت تنش در شکل 3 را میتوان به حرارت بالای اعمال شده به سطح قطعه کار در حین ماشین کاری نسبت داد. در ماشین کاری با افزایش حرارت در ناحیه برش بخشی از حرارت ایجاد شده به سطح قطعه کار منتقل میشود که موجب تغییر در میکروساختار فلز، انبساط موضعی و اعمال تنش-های پسماند به ویژه کششی میشود [8].

در طی آزمایشهای انجام شده، حرارت منتقل شده به قطعه کار و ایجاد گرادیان حرارتی در سطح قطعه کار با استفاده از دوربین مادون قرمز به خوبی قابل مشاهده بوده است. شکل 12 دو تصویر حرارتی از قطعه کار و ناحیه برش را در حین ماشین کاری نمایش میدهد. همان گونه که در این شکل مشاهده میشود در هر دو تصویر در موقعیتهای مشخص شده با فلش، یعنی در محیط داخلی قطعه کار و در محدوده تماس ابزار با قطعه کار، حرارت در یک نوار باریک به طور قابل توجهی بالاتر از نواحی دیگر است که نشانگر انتقال بخشی از حرارت ایجاد شده در ناحیه برش به قطعه کار است.

نکته قابل توجه اینکه حرارت منتقل شده علاوه بر تأثیر بر نواحی سطحی ماشینکاری شده، سرتاسر مقطع قطعه کار را تحت تأثیر قرار داده است، به طوری که در محیط داخلی نیز یک گرادیان حرارتی ایجاد شده است. این گرادیان حرارتی برای کلیه مقاطع در طول ماشینکاری تکرار می-شود که موجب انبساط موضعی و به وجود آمدن تنشهای پسماند در سرتاسر قطعه کار می گردد. با افزایش حرارت در ناحیه برش، حرارت منتقل شده به قطعه کار نیز افزایش یافته است. این مطلب را به خوبی می توان از دو تصویر موجود در شکل 12 مشاهده نمود.

4-3- ارتباط توزيع تنش با اعوجاج قطعات

به منظور استفاده از یک شاخص کمی برای مقایسه توزیع تنشهای پسماند و بررسی ارتباط آن با میزان اعوجاج ثبت شده در قطعات، مساحت محصور بین نمودار تنش و محورهای عمودی و افقی محاسبه شده است. بدین منظور با در نظر گرفتن ناحیه محصور بین نمودار تنش و محورهای افقی (عمق نفوذ) و عمودی (میزان تنش) و استفاده از یک مقیاس طولی (cm) در دو محور، مساحت این ناحیه محاسبه شده است. با استفاده از این روش میتوان بخوبی سطح تنشهای اعمال شده در قطعات مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود چرا که با افزایش میزان تنشها و عمق نفوذ آنها، مساحت محصور افزایش یافته است. در شکل 13 مساحت محصور نمودار تنش در پنج قطعه اندازه گیری شده و میزان آن نشان داده شده است که بیشترین مساحت محصور متعلق به قطعه شماره 1 به میزان ² ma 15.05 و کمترین آن متعلق به قطعه شماره 2 به میزان ²

در شکل 14 با استفاده از یک نمودار دو ستونه ارتباط مساحت محصور و

nme.	ر ت
from n	ہ از
nloaded	ئونه
[Dowi	دار،
	جاج
8.1]	جود
15.12.23	بزان
.1394.	بسه
27594(، عد
01.1.10	
: 20.10	12 .
[DOR	

مقایسه نمودارهای مربوط به کمترین و بیشترین میزان حرارت، میتوان
مشاهده کرد که با افزایش حرارت نیز سطح تنشها افزایش یافته و همچنین
حوه توزیع آنها نیز تغییر کرده است. در نمودار شماره 3 که بیشترین حرارت
به میزان [°] 203 اندازه گیری شده است، حالت توزیع تنش با چهار قطعه دیگر
متفاوت بوده است. در این قطعه در سطح تنشهای کششی ایجاد شده و با
فزایش عمق، تنشها به تدریج به فشاری تبدیل شدهاند. در قطعه شماره 4
که کمترین میزان حرارت در آن ثبت شده است، سطح تنش نسبت به نمودار
ننش قطعه شماره 3 پایینتر بوده است چرا که علاوه بر حرارت کمتر، نیروی
کمتری نیز به سطح قطعه کار در حین ماشینکاری اعمال شده است. این

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

میزان اعوجاج تفاوت چشم گیری داشته است. لازم به ذکر است که در اندازهگیری تنشهای پسماند با روش x-ray، تنها تنشهای موجود در راستای مماسی قطعه (در جهت سرعت برش) اندازه گیری شده است و از بررسی تنشها در دو جهت محوری و شعاعی صرف نظر شده است. به دلیل وارد شدن نیروی بیشتر به قطعه کار در حین ماشین کاری در جهت مماسی و سطح بالاتر تنشها در این جهت، تنشهای ایجاد شده در این جهت، از اهمیت بیشتری در ایجاد اعوجاج برخوردار هستند. اختلاف در شیب افزایش اعوجاج نسبت به افزایش مساحت می تواند با نحوه توزیع تنش در دو راستای شعاعی و محوری و موارد دیگر همچون باقی ماندن تنشهای اولیه و ناهمگونی مواد مرتبط باشد.

در تحلیل نتایج به دست آمده می توان گفت که با تنشزدایی قطعات قبل از ماشین کاری نهایی، سطح تنشها به ویژه تنشهای سطحی که در معرض حرارت مستقيم بودهاند به طور قابل توجهي كاهش يافته است و قطعه کار قبل از ماشین کاری نهایی از لحاظ تنشهای داخلی به تعادل رسیده است. انجام ماشین کاری بر روی قطعات، منجر به اعمال سطح بالایی از تنش-های پسماند در قطعه کار می شود که موجب از بین رفتن تعادل تنشهای پسماند کششی و فشاری داخل قطعهکار میگردد. عدم تعادل تنشهای داخلی موجب تغییر شکل و نایایداری ابعادی قطعه کار تا ایجاد تعادل مجدد می شود. بنابراین هر چه سطح تنشها و عمق نفوذ آنها افزایش یابد، میزان عدم تعادل تنشهای داخلی افزایش یافته و در نتیجه اعوجاج و تغییر ابعاد بیشتری در قطعات ماشین کاری شده به وجود میآید.



Fig. 13 The enclosed area in five stress diagrams **شکل** 13 مساحت محصور در پنج نمودار تنش با درنظر گرفتن یک مقیاس طولی در



4- **نتيجه گيري**

در این پژوهش به بررسی تأثیر تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ و ماشین کاری بر میزان اعوجاج قطعات جدار نازک پرداخته شد. در یک نتیجهگیری کلی بر مبنای نتایج به دست آمده میتوان گفت اعوجاج در ماشین کاری قطعات جدار نازک آلیاژهای آلومینیم، تابع مستقیم تنشهای یسماند است. هر دو گروه تنش های موجود در قطعات خام (ناشی از کوئنچ) و تنشهای اعمال شده در طی ماشین کاری، در ایجاد اعوجاج در قطعات موثر هستند و با انتخاب استراتژیهای مناسب می بایست تا حد امکان سطح این تنشها را در قطعات کاهش داد.

در صورتی که سطح تنشهای ناشی از کوئنچ در یک قطعه بالا باشد، حتى با انتخاب بهينه ترين شرايط ماشين كارى نيز، نرخ اعوجاج بالا خواهد بود. این موضوع در ماشین کاری قطعه کوئنچ شده در آب اثبات گردید. در این قطعه با وجود انتخاب یک استراژی ماشین کاری مناسب، بهعلت وجود سطح بالای از تنش در قطعه خام، میزان اعوجاج قطعه کار بسیار بالا بوده است و به میزان117.25µm ثبت شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش های کوئنچ انجام گرفته در این تحقیق نشان داد که روش کوئنچ پلیمری یک فرایند کاربردی و مناسب جهت کاهش تنشهای پسماند و اعوجاج است. بنابراین در پروسه تولید قطعات حساس جدارنازک، ابتدا می ایست از سطح تنشهای یسماند در مواد اطمینان حاصل نمود و در صورت ضرورت قبل از انجام ماشین کاری، قطعات را با روش کوئنچ یلیمری تحت عملیات حرارتی قرار داد.

از طرف دیگر انتخاب مناسب ترین پارامترهای ماشین کاری جهت دستیابی به قطعات بدون اعواج، ضروری است. بر اساس نتایج آزمایشهای ماشین کاری، حتی در یک قطعه تنش زدایی شده، در صورتی که شرایط ماشین کاری بهینه نباشد، نرخ اعوجاج قطعات بالا خواهد بود. در طی آزمایشها در یکی از قطعات که ابتدا تنش زدایی شده و سپس ماشین کاری شده است، به علت اعمال نیرو و حرات بالا به قطعه کار و ایجاد سطح بالایی از تنش پسماند، اعوجاجی به بزرگی µm 95.63 اندازه گیری شده است. بنابراین میتوان گفت مهمترین اصل در کاهش تنشهای پسماند ناشی از ماشین کاری و کاهش پتانسیل اعوجاج، کاهش نیروها و حرارت اندازه گیری در طی ماشین کاری است که می بایست با انتخاب استراتژی های مختلف این هدف تامين شود.

5**- مراجع**

- [1] B. Denkena, D. Boehnke, L. De Leon, Machining induced residual stress in structural aluminum parts, Production Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 247-253, 2008.
- [2] E. Brinksmeier, J. Sölter, Prediction of shape deviations in machining, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 58, No. 1, pp. 507-510, 2009.
- [3] P. J. Withers, H. Bhadeshia, Residual stress. Part 2-Nature and origins, Materials science and technology, Vol. 17, No. 4, pp. 366-375, 2001

- [4] D. A. Tanner, J. S. Robinson, Residual stress magnitudes and related properties in quenched aluminium alloys, Materials science and technology, Vol. 22, No. 1, pp. 77-85, 2006.
- [5] T. Croucher, Using polyalkylene glycol quenchants to effectively control distortion and residual stresses in heat treated aluminum alloys, Journal of ASTM International (JAI), Vol. 1523, pp. 309-331, 2010.
- [6] T. Croucher, Minimizing Machining Distortion in Aluminum Alloys through Successful Application of Uphill Quenching--A Process Overview, Journal of ASTM International (JAI), Vol. 1523, pp. 332-351, 2010.
- [7] J. P. Davim, Surface integrity in machining: Springer, 2010.
- [8] Z. T. Tang, Z. Q. Liu, Y. Z. Pan, Y. Wan, X. Ai, The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No. 9, pp. 4502-4508, 2009.

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

سعید امینی و همکا*ر*ان

بررسی تأثیر تنشهای پسماند ناشی از کوئنچ و ماشین کاری بر اعوجاج قطعات جدارناز ک

- [16] L. Nowag, J. Sölter, A. Walter, E. Brinksmeier, Effect of machining parameters and clamping technique on residual stresses and distortion of bearing rings, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 37, No. 1, pp. 45-51, 2006.
- [17] E. Brinksmeier, J. Sölter, C. Grote, Distortion engineering–identification of causes for dimensional and form deviations of bearing rings, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 109-112, 2007.
- [18] X. Yang, J. Zhu, Z. Nong, Z. Lai, D. He, FEM Simulation of quenching process in A357 aluminum alloy cylindrical bars and reduction of quench residual stress through cold stretching process, *Computational Materials Science*, Vol. 69, pp. 396-413, 2013.
- [19] P. J. Withers, H. Bhadeshia, Residual stress. Part 1–measurement techniques, *Materials science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 355-365, 2001.
- [20] D. A. Lados, D. Apelian, L. Wang, Minimization of residual stress in heattreated Al–Si–Mg cast alloys using uphill quenching: Mechanisms and effects on static and dynamic properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 13, pp. 3159-3165, 2010.
- [21] Q. C. Wang, L. T. Wang, W. Peng, Thermal stress relief in 7050 aluminum forgings by uphill quenching, *Materials Science Forum*, Vol. 490, No. 2, pp. 97-101. 2005.

- [9] I. S. Jawahir, E. Brinksmeier, R. M'Saoubi, D. K. Aspinwall, J. C. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello, A. D. Jayal, Surface integrity in material removal processes: Recent advances, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 2, pp. 603-626, 2011.
- [10] S. Masoudi, S. Amini, E. Saeidi, H. Eslami-Chalander, Effect of machininginduced residual stress on the distortion of thin-walled parts, *International Journal of Advanced Manufacturing*, Vol. 76, No. 1-4, pp. 597-608, 2015.
- [11] J.-F. Chatelain, J.-F. Lalonde, A. S. Tahan, Effect of residual stresses embedded within workpieces on the distortion of parts after machining, *International Journal of Mechanics*, Vol. 6, No. 1, pp. 43-51, 2012.
- [12] M. Zhongyi, W. Yunqiao, A. Saleem, Distortion analysis of arc shaped workpiece in NC machining, *in Proceeding of the World Congress on Engineering*, Vol. 3. 2011.
- [13] J. S. Robinson, S. Hossain, C. E. Truman, A. M. Paradowska, D. J. Hughes, R. C. Wimpory, M. E. Fox, Residual stress in 7449 aluminium alloy forgings, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 10, pp. 2603-2612, 2010.
- [14] B. Denkena, C. Schmidt, M. Krüger, Experimental investigation and modeling of thermal and mechanical influences on shape deviations in machining structural parts, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 11, pp. 1015-1021, 2010.
- [15] B. Denkena, B. Breidenstein, Influence of the Residual Stress State on Cohesive Damage of PVD-Coated Carbide Cutting Tools, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, No. 7, pp. 613-616, 2008.

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12