



بررسی تأثیر تنش‌های پسماند ناشی از کوئنچ و ماشین‌کاری بر اعوجاج قطعات جدارنازک

سعید امینی^{1*}، 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 8731751167، amini.s@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 تیر 1394

پذیرش: 30 شهریور 1394

ارائه در سایت: 14 آذر 1394

کلید واژگان:

تنش پسماند

اعوجاج

ماشین‌کاری

کوئنچ

قطعات جدار نازک

آلیاژ A17075

چکیده

یکی از مشکلات اصلی در ماشین‌کاری قطعات جدار نازک از جنس آلیاژهای استحکام بالای آلومینیم، اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات بعد از ماشین‌کاری است که منجر به افزایش نرخ قطعات معیوب و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود. در این مقاله رابطه تنش‌های پسماند ناشی از کوئنچ و ماشین‌کاری قطعات، با میزان اعوجاج یک قطعه جدار نازک از جنس آلیاژ A17075 مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، دو گروه آزمایش انجام شده است. در مرحله اول به بررسی ارتباط تنش‌های پسماند ناشی از فرایند کوئنچ با اعوجاج پرداخته شده است. با انجام آزمایش‌های تجربی، اثر بخشی دو روش کوئنچ پلیمری و کوئنچ معکوس در کاهش تنش‌های پسماند در مقایسه با کوئنچ در آب بررسی شده است و رابطه سطح تنش‌ها با میزان اعوجاج بررسی شده است. در مرحله دوم با آزمایش‌هایی با شرایط مختلف ماشین‌کاری و اندازه‌گیری نیرو، حرارت و 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 ایجاد اعوجاج در قطعات مؤثر هستند و که می‌بایست با انتخاب استراتژی‌های مناسب تا حد امکان سطح این تنش‌ها را کاهش داد.

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

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

ABSTRACT

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 is studied by measurement of stress on some parts. The results indicate that both machining and quench-induced residual stresses are effective in distortion of thin walled parts.

1- مقدمه

نیست [1]. یکی از مشکلات اصلی در ماشین‌کاری قطعات جدار نازک، اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات بعد از ماشین‌کاری است که منجر به افزایش نرخ قطعات معیوب و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود. اعوجاج قطعات می‌تواند در گستره‌ای از چند میکرومتر در قطعات کوچک تا چندین سانتی‌متر در قطعات بزرگ قرار گیرد [2]. مهم‌ترین عامل در اعوجاج قطعات جدار نازک به ویژه قطعات از جنس آلیاژهای آلومینیم، تنش‌های پسماند

در صنایع هوا فضا و خودروسازی به دلیل مسائلی مانند کاهش وزن کلی سازه‌ها، کاهش مصرف سوخت، کمبود فضا و غیره، طراحی و استفاده از قطعات یکپارچه جداره نازک از جنس آلیاژهای آلومینیم که از ضریب استحکام به وزن بالایی برخوردارند، رو به گسترش است. در ماشین‌کاری این 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

وسیله بر همکنش تنش‌های موجود در مواد خام و تنش‌های ناشی از ماشین‌کاری ایجاد می‌شود که به عنوان عامل اصلی اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات عمل می‌کنند. در بسیاری از موارد، قطعات بعد از ماشین‌کاری در دامنه تolerانس‌های ابعادی و هندسی مورد نظر قرار دارند اما با گذشت زمان و یا با نصب قطعه در محل مورد نظر، ابعاد و به ویژه تolerانس‌های هندسی با تغییر و اعوجاج رو به رو می‌شوند [8].

در چند دهه اخیر، پژوهش‌های فراوانی با استفاده از تحقیقات تجربی، مدل‌های المان محدود و تحلیلی و همچنین ترکیبی از آنها جهت بررسی و پیش‌بینی تنش‌های پسماند ناشی از عملیات حرارتی، فرایندهای تولید مواد و ماشین‌کاری در فلزات مختلف صورت گرفته است [9, 10]. چاتلیان و همکارانش با انجام تحقیقات تجربی تأثیر تنش‌های پسماند موجود در مواد اولیه بر اعوجاج قطعات بعد از ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری 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 ضخیم تنش‌های اولیه عامل اصلی اعوجاج قطعات است [12]. رویینسون و همکارانش 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 ماشین‌کاری، موجب توزیع مجدد تنش‌ها در قطعه کار می‌گردد و هیچ گونه آزاد سازی تنش صورت نمی‌گیرد، چرا که شدت انرژی کرنش برای بلوک‌های ماشین‌کاری شده و نشده برابر بوده است. همچنین آنها اعلام کردند که با افزایش میزان برداشت مواد، اعوجاج افزایش می‌یابد [13].

دنکنا و دیگر همکارانش با بررسی اثر شرایط ماشین‌کاری و هندسه ابزار بر تنش‌های پسماند در فرزکاری آلیاژ Al7449، تأثیر مستقیم این پارامترها بر توزیع تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری 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 می‌گردد [14]. دنکنا و دیگر همکارانش نشان دادند بارهای حرارتی و مکانیکی اعمال شده به قطعه کار در ماشین‌کاری قطعات جدار نازک، موجب تغییر شکل قابل توجهی در ساختار و ابعاد قطعه کار در حین ماشین‌کاری می‌شود [15]. نووانگ و دیگر همکارانش اعلام کردند که نیروهای ناشی از گیره‌بندی قطعات می‌توانند موجب تغییر شکل الاستیک قابل توجه قطعات جدار نازک در حین ماشین‌کاری گردد. این تغییر شکل موجب تغییر توزیع تنش‌های پسماند و اعوجاج قطعات بعد از ماشین‌کاری می‌شود [16]. برینکسمایر با استفاده از یک مدل تحلیلی، پتانسیل اعوجاج قطعات استوانه‌ای جدار نازک ماشین‌کاری 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 تلاش‌های اشاره شده، تاکنون مکانیزم اعوجاج و تغییر شکل قطعات جدارنازک به طور دقیق مشخص نشده است. همچنین شناخت و پیش‌بینی 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 بررسی شده است.

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 ماشین‌کاری به وجود می‌آیند [3].

تنش‌های ناشی از کوئنچ به علت 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 تسلیم پایین‌تر بخش‌های مرکزی قطعه که ناشی از نرخ انتقال حرارت کمتر 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 حرارتی 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 می‌دهند 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 تنش‌های پسماند می‌گردد [5].

یکی دیگر از روش‌های کارآمد 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 (-196°C) نگاه داشته می‌شوند و سپس در معرض حرارت بسیار بالا (200°C) 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 ماشین‌کاری هستند. در این فرایندها، بارهای مکانیکی و حرارتی شدیدی به صورت هم‌زمان بر سطح قطعه کار 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 می‌گردد. 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 ماشین‌کاری شده می‌شود و عمدتاً منجر به تشکیل تنش‌های پسماند کششی می‌شود [7]. توزیع نهایی تنش در قطعات، به

1- Poly Alkylene Glycol
2- Uphill Quenching

25°C کوئنچ شده‌اند و در نهایت در دمای 120°C به مدت 24 ساعت تحت عملیات پیرسختی قرار گرفته‌اند (عملیات حرارتی T6). تخمین زده می‌شود که عملیات پیرسختی 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 استاندارد AMS 3025 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 دمای 196°C- غوطه ور شده‌اند. سپس قطعات درون یک محفظه بخار قرار گرفته و به مدت 80 ثانیه در معرض بخار آب با فشار 14 بار قرار گرفته‌اند به طوری که دمای قطعات به 190°C رسیده است و سپس تحت عملیات پیرسختی قرار گرفته‌اند. در شکل 1 دیاگرام زمان-حرارت سه گروه مختلف قطعات کوئنچ شده نشان داده شده است. در مرحله بعد جهت بررسی تأثیر تنش‌های پسماند ناشی از کوئنچ بر اعوجاج قطعات ماشین‌کاری شده، آزمایش‌های یکسان ماشین‌کاری بر روی سه گروه قطعات انجام شده است.

2-2- هندسه قطعه‌کار و شرایط ماشین‌کاری

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

2-3- 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 ورودی در نظر گرفته شده‌اند. در طی آزمایش‌ها، نیروی ماشین‌کاری و حرارت ناحیه برش اندازه‌گیری شده است تا رابطه این دو خروجی فرایند با تنش‌های پسماند و اعوجاج بررسی گردد. جدول 1 سطوح مختلف در نظر گرفته شده برای هر پارامتر را نمایش می‌دهد. برای پارامترهای سرعت برش و نرخ پیشروی، به ترتیب چهار و سه سطح در نظر گرفته شده است که گستره‌ای از کمترین تا بیشترین سرعت برش و پیشروی قابل انتخاب بر روی ماشین است تا اثر بهترین و بدترین شرایط ماشین‌کاری بر اعوجاج قطعات مشخص شود.

به منظور اطمینان از اینکه تنش‌های اندازه‌گیری شده در مراحل بعد، تنها ناشی از شرایط ماشین‌کاری باشند، کلیه 24 قطعه مورد بررسی بعد از

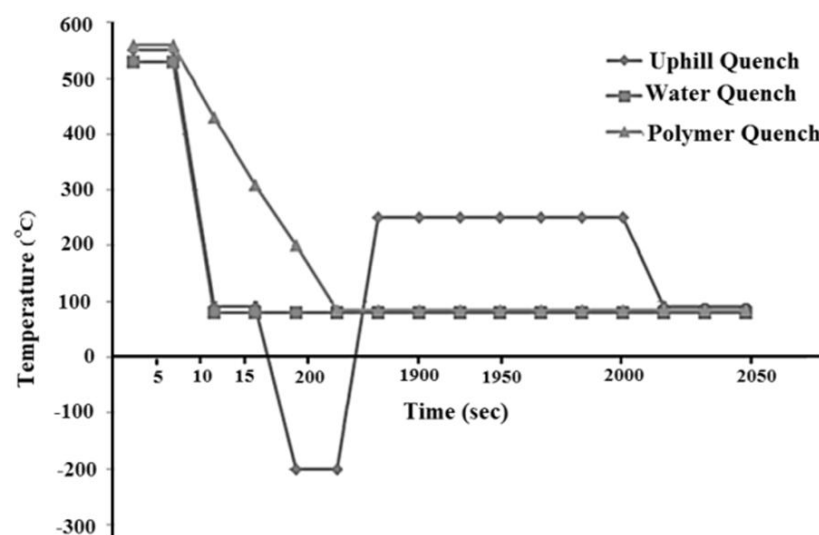


Fig. 1 The time-heat diagram of the quenching parts

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

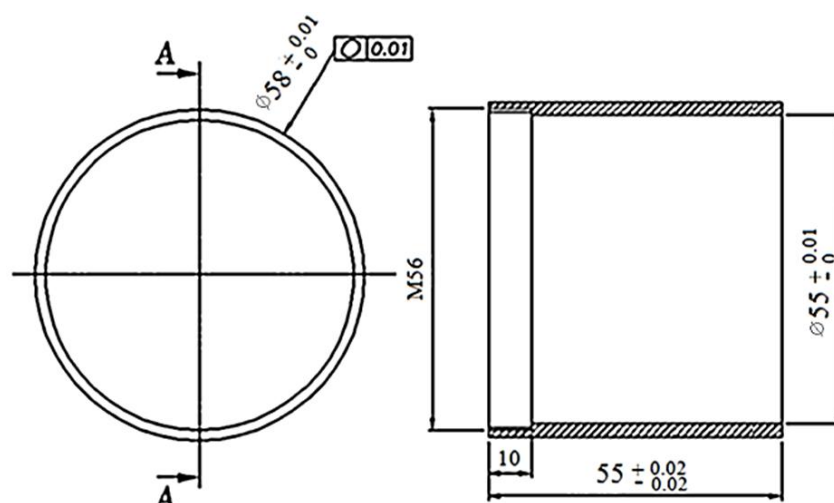


Fig. 2 Final geometry of work piece

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

The different levels considered for each parameter					
پارامتر	سطح				واحد
	1	2	3	4	-
سرعت برش	230	350	470	590	m/min
نرخ پیشروی	60	120	180	-	mm/min
جنس ابزار	PCD	کاربیدی	-	-	-

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 اندازه‌گیری 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- شرایط و روند آزمایش‌ها

1-2- طراحی آزمایش‌های کوئنچ

به منظور بررسی اثر بخشی دو روش کوئنچ پلیمری و کوئنچ معکوس در کاهش تنش‌های پسماند در مقایسه با روش کوئنچ آب، چندین آزمایش مختلف بر روی 120 قطعه‌کار استوانه‌ای با قطر و طول 60 mm از جنس Al7075-T6 انجام گرفت. قطعات به سه گروه 4 تایی تقسیم شده و بر روی هر گروه آزمایش‌های با شرایط متفاوتی انجام شده است.

گروه اول قطعات ابتدا به مدت 20 دقیقه در دمای 470°C جهت عملیات انحلال در کوره حرارت داده شده‌اند. سپس قطعات در یک محفظه آب با دمای

6-2- اندازه‌گیری تنش پسماند

تنش‌های پسماند نمی‌توانند به طور مستقیم اندازه‌گیری شوند و تنها تأثیرات آنها می‌تواند مشاهده و اندازه‌گیری شود. این تغییرات شامل کرنش، جابه‌جایی و ایجاد تغییرات در ساختار مواد است و با توجه به میزان و شدت این تأثیرات مقدار و توزیع تنش‌های پسماند تخمین زده می‌شود [19]. تنش‌های ناشی از کوئنچ و ماشین‌کاری دارای ماهیت متفاوتی هستند. تنش‌های ناشی از ماشین‌کاری حداکثر تا عمق 0.2mm زیر سطح ماشین‌کاری تشکیل می‌شوند در صورتی که تنش‌های ناشی از کوئنچ در سرتاسر مقطع قطعه‌کار به وجود می‌آیند. بنابراین می‌بایست از روش‌هایی با قابلیت‌های مختلف برای اندازه‌گیری این تنش‌ها استفاده کرد.

به منظور اندازه‌گیری تنش‌های ناشی از ماشین‌کاری از روش اندازه‌گیری پراش اشعه ایکس¹ استفاده شده است. در اندازه‌گیری‌ها با استفاده از اشعه $\text{Co-K}\alpha$ خط تداخل از صفحه کریستالی $\{3\ 3\ 1\}$ آلومینیم تحت هفت زاویه Ψ (0-13-18-27-33-39-45 درجه) و زوایای 20 بین 144 و 154 درجه، اندازه‌گیری شده است. سپس تنش‌های پسماند در راستای سرعت برش با استفاده از روش $\sin 2\Psi$ اندازه‌گیری شده‌اند. برای افزایش عمق اندازه‌گیری به وسیله روش الکتروپولیش یک دایره به قطر 5 mm لایه برداری شده است و سپس اندازه‌گیری در عمق مورد نظر انجام شده است. در شکل 5 اندازه‌گیری تنش پسماند در استوانه جدارنازک با استفاده از روش اندازه‌گیری پراش اشعه ایکس نشان داده شده است.

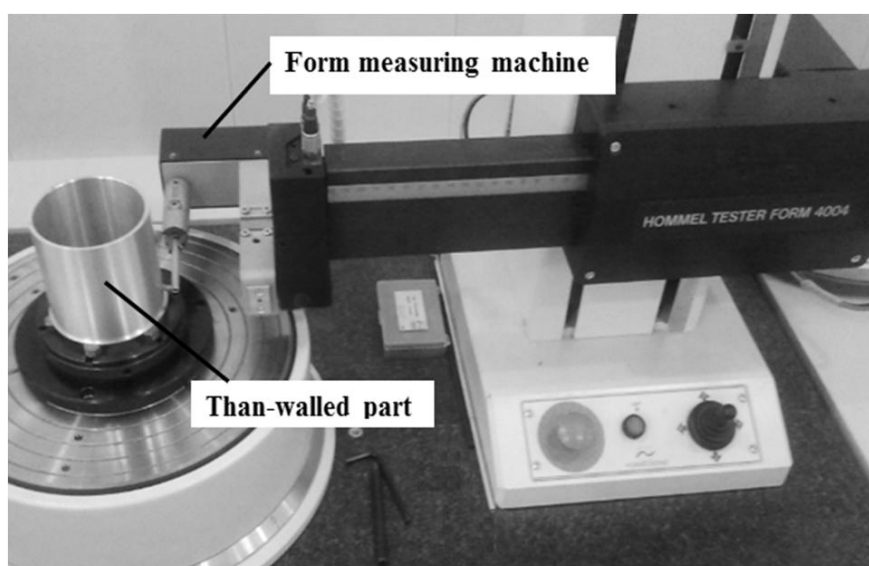


Fig. 4 Measurement of distortion in the work piece by the form measurement machine

شکل 4 اندازه‌گیری تیرانس‌های هندسی قطعه‌کار بر روی ماشین اندازه‌گیری فرم

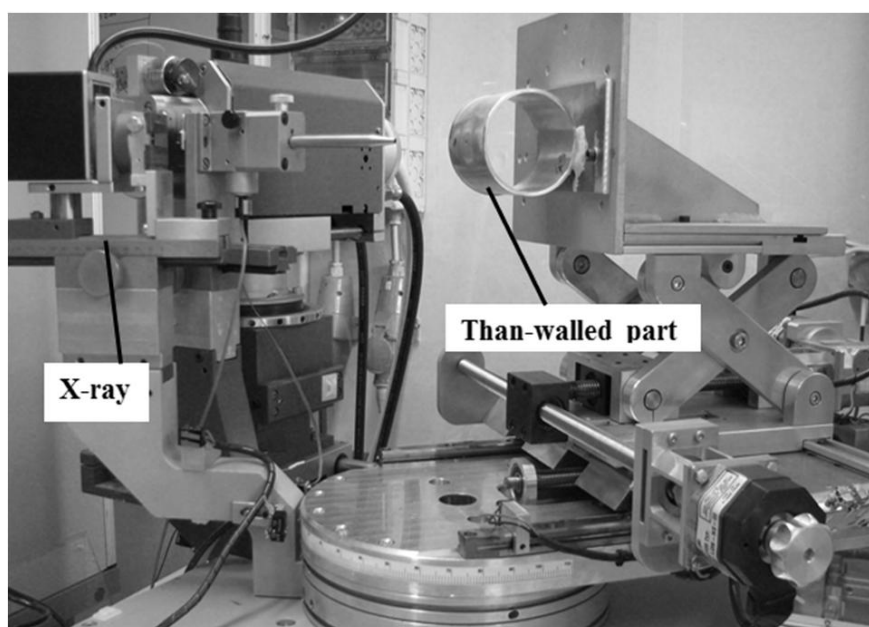


Fig. 5 Measurement of residual stress in the parts by X-ray method

شکل 5 اندازه‌گیری تنش‌های ناشی از ماشین‌کاری در دستگاه x-ray

1- X-ray Method

عملیات خشن‌تراشی، تنش‌زدایی شده‌اند 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 470 m/min و نرخ پیشروی 120mm/min و عمق 2 mm انجام گرفته است.

4-2- اندازه‌گیری نیرو و حرارت

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

برای اندازه‌گیری حرارت از یک دوربین مادون قرمز حرارتی (مدل DL700 ساخت شرکت دالی) استفاده شده است که دارای محدوده طیفی $8-14\ \mu\text{m}$ ، رزولوشن گرمایی 1°C و نرخ فریم 50 تا 60 Hz 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 اندازه‌گیری‌ها، هدف اندازه‌گیری ماکزیمم حرارت براده بوده است. در شکل 3 چیدمان تجهیزات جهت اندازه‌گیری نیرو و حرارت بر روی ماشین CNC نشان داده شده است.

5-2- اندازه‌گیری اعوجاج قطعات

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

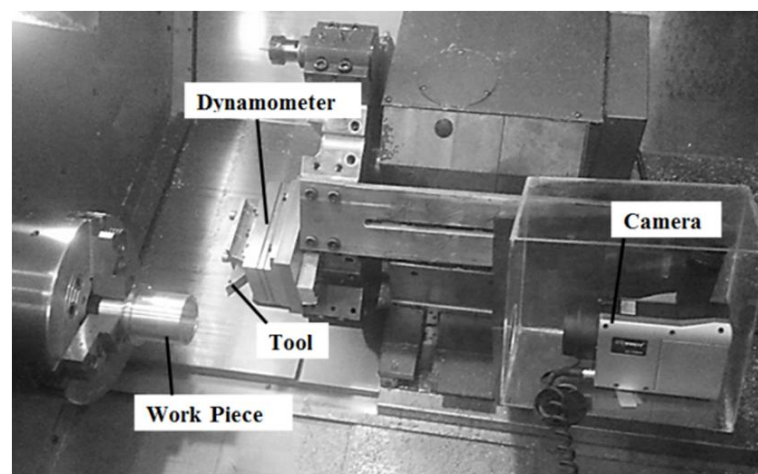


Fig. 3 The experimental set-up

شکل 3 چیدمان تجهیزات برای اندازه‌گیری نیرو و حرارت

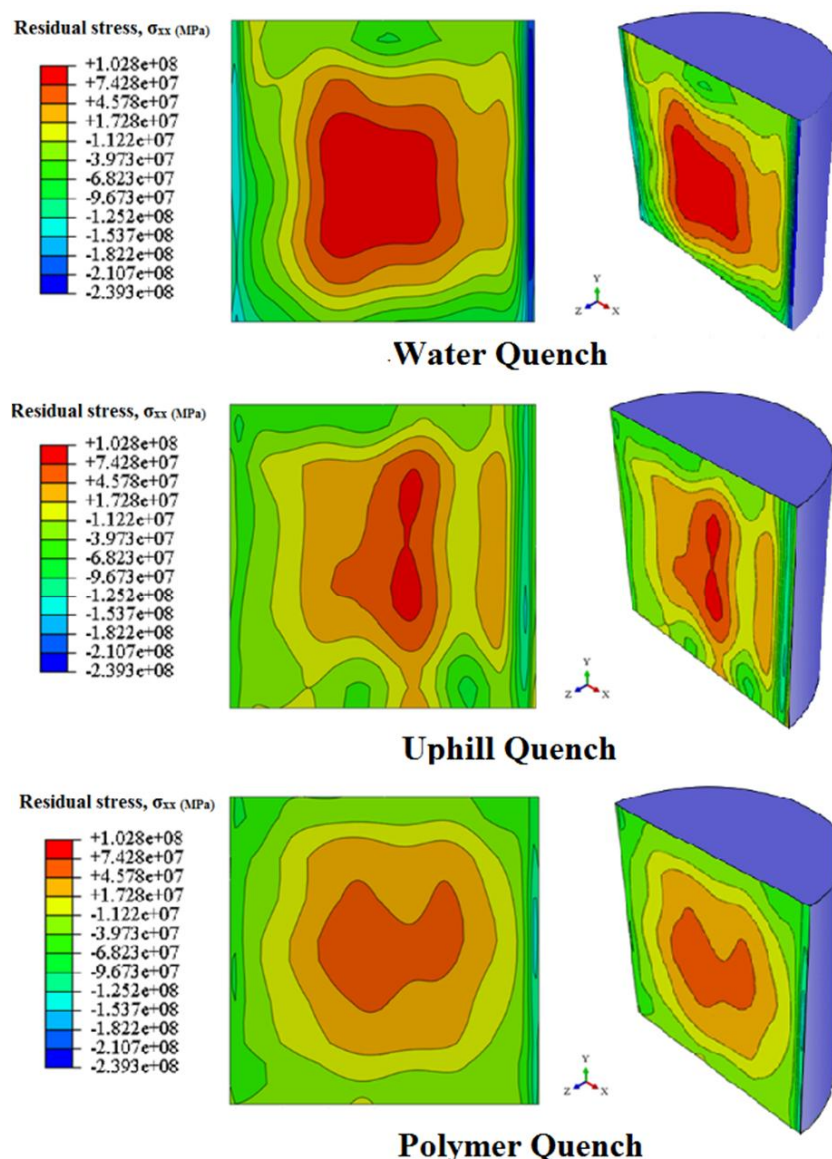


Fig. 6 The Contour of residual stress distribution in the quenched parts
 شکل 6 کانتور توزیع تنش پسماند به دست آمده از روش کانتور در سه قطعه کوئنچ شده با شرایط مختلف

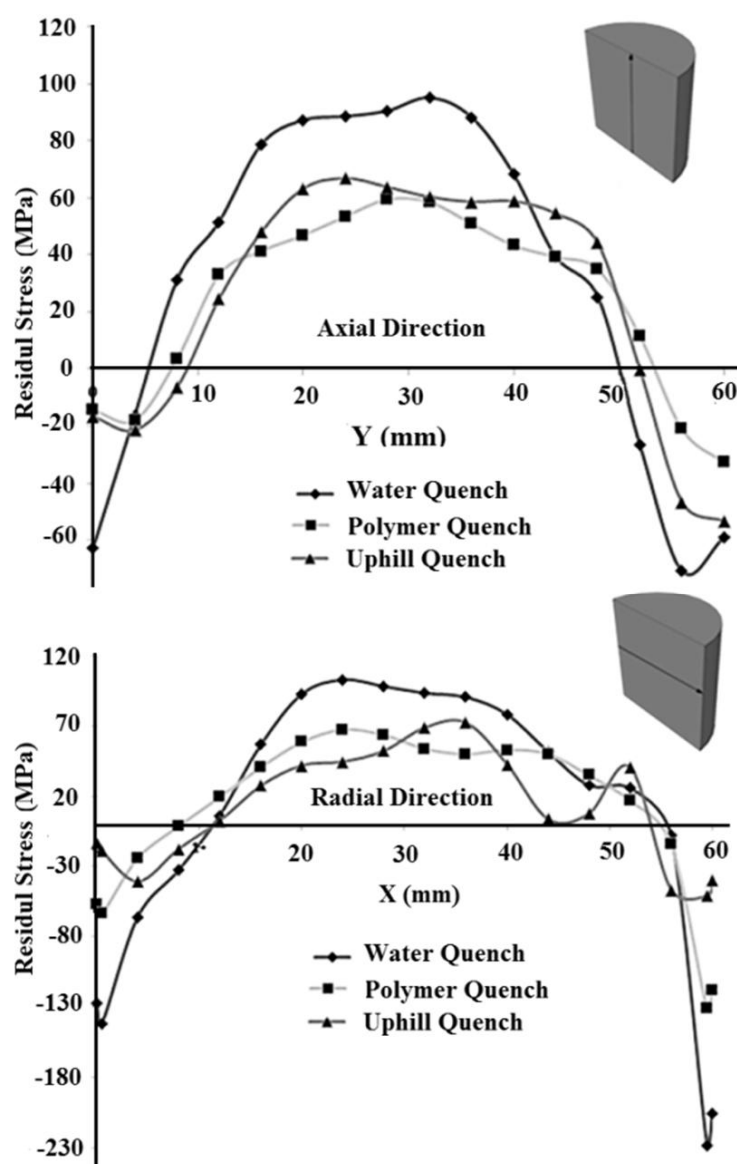


Fig. 7 Residual stress distribution in axial and radial directions in the quenched parts

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

همچنین برای اندازه‌گیری تنش‌های ناشی از کوئنچ، از روش کانتور¹ استفاده شده است. روش کانتور یک روش مخرب برای اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری 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. اندازه‌گیری سطح تنش‌های پسماند به وسیله روش کانتور شامل چهار مرحله بوده که در ادامه تشریح شده است:

1- برش نمونه: مناسب‌ترین 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 حرارتی 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 قطعه کار به تعادل حرارتی برسند.

2- اندازه‌گیری 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 یک ماشین 3CMM اندازه‌گیری شده است. همچنین با اندازه‌گیری زبری سطح برش داده شده، زبری سطح از کانتور اندازه‌گیری شده، فیلتر شده است. 3- تحلیل نتایج: جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر، با استفاده از روش نقطه به نقطه کانتورهای اندازه‌گیری شده میانگین‌یابی شده‌اند. میانگین‌یابی کانتور دو سطح موجب می‌شود اثر تنش‌های برشی و عیوب به وجود آمده در برش 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 اندازه‌گیری 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 تنش پسماند در مقطع برش داده شده به دست آمده است.

3- نتایج

3-1- 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

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 می‌گردد. فیلم ایجاد شده به عنوان یک عایق عمل کرده و موجب نرخ خنک شوندگی کاملاً یکنواخت و کاهش گرادیان حرارتی در سطح و مرکز قطعه کار می‌شود که موجب کاهش قابل توجهی در سطح تنش‌های پسماند می‌شود.

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 تئوری‌ها و نتایج ارائه شده توسط محققان دیگر 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 تقریباً یکنواخت و نزدیک به صفر می‌گردد [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 محدودیت‌های فراوانی همراه است. میزان کاهش تنش‌ها در روش کوئنچ معکوس در این تحقیق، بسیار نزدیک به روش کوئنچ پلیمری بوده است. با این وجود انجام روش کوئنچ پلیمری بسیار ساده و آسان است و در مقایسه با روش کوئنچ معکوس نیاز به تجهیزات گران قیمت جهت غوطه‌وری در نیتروژن و بخاردهی قطعات ندارد. همچنین زمان فرایند کوئنچ پلیمری بسیار کوتاه‌تر از کوئنچ معکوس است. مقایسه نمودارهای تنش در شکل 7 نشان می‌دهد که قطعه کوئنچ شده در پلیمر به دلیل گرادیان حرارتی یکنواخت، توزیع تنش یکنواخت تری نسبت به روش کوئنچ معکوس داشته است.

3-2- 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 بار تکرار شده است. بعد از انجام آزمایش‌ها اعوجاج در کلیه قطعات اندازه‌گیری شده است. در شکل 8، میانگین میزان اعوجاج سه قطعه کوئنچ شده نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود، جداره باقیمانده پس از ماشین‌کاری در فواصل 2 تا 5 mm و همچنین 55 تا 58 mm از قطعه خام قرار می‌گیرد. 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

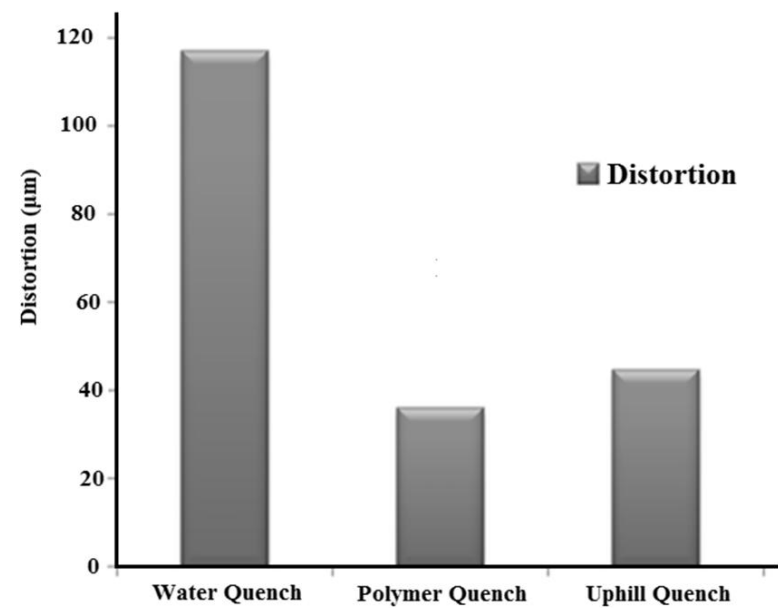


Fig. 8 The distortion average of the quenched part after machining

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 شکل‌گیری سطح بالایی از تنش‌های فشاری در سطح و کششی در مرکز قطعه شده است به طوری که مقدار این تنش‌ها در نواحی سطحی به 230 MPa- و در نواحی مرکزی به 100 MPa 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 60 MPa- 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 150 MPa- و در سمت دیگر تا 230 MPa نیز رسیده است. تفاوت در سطح و توزیع این تنش‌ها در این دو راستا، به خوبی تأثیر هندسه قطعات بر توزیع تنش‌های پسماند و همچنین گرادیان حرارتی متفاوت در قسمت‌های 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 می‌گیرد که موجب جوشش آب می‌شود. در این مرحله به علت نرخ انتقال حرارت تقریباً 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 پایان یافته و انتقال حرارت به صورت رسانش گرمایی¹ انجام می‌گیرد که از

1- Conduction

نتایج ثبت شده در شکل 9 نشانگر این است که با افزایش نیروی ماشین‌کاری، میزان اعوجاج قطعات با وجود نوسانات، از یک روند افزایشی برخوردار بوده است. با این وجود، همانگونه که در شکل 10 مشاهده می‌شود، اعوجاج اندازه-گیری شده در قطعات با افزایش حرارت نوسانات شدیدی داشته است. در عین حال شیب افزایش اعوجاج قطعات نسبت به افزایش حرارت، 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 ($108^{\circ}\text{C} (\pm 0.5)$) اندازه‌گیری 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 ماشین‌کاری، 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 نیرو-اعوجاج کمتر است چرا که افزایش نیروها نسبت به تغییر 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 ماشین‌کاری نسبت به حرارت تأثیر بیشتری بر ایجاد اعوجاج در قطعات جدار نازک دارند. میزان اعوجاج قطعاتی که با استفاده از ابزار PCD ماشین‌کاری شده‌اند به علت اینکه در طی ماشین‌کاری، بارهای حرارتی و مکانیکی کمتری به آنها وارد شده است پایین‌تر از گروه دیگر قطعات بوده است. بنابراین می‌توان با استفاده از ابزارهای PCD، از سرعت برش و نرخ پیشروی بالاتر استفاده نمود که موجب افزایش راندمان تولید و کاهش پتانسیل اعوجاج می‌شود.

در مرحله بعد به منظور بررسی ارتباط توزیع تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری 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 اندازه‌گیری شده است. تنش در قطعاتی اندازه‌گیری شده که در طی آزمایش‌ها کمترین و بیشترین نیرو، حرارت و اعوجاج در آنها اندازه‌گیری شده است. جدول 2 شرایط قطعات انتخاب شده برای اندازه‌گیری تنش را نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج موجود در جدول 2، در آزمایشی که بیشترین نیروی ماشین‌کاری ثبت شده است، بیشترین میزان اعوجاج نیز اندازه‌گیری شده است که بیانگر تأثیر مستقیم نیروی وارد بر قطعه‌کار، بر میزان اعوجاج است. همچنین در قطعه‌ای کمترین میزان اعوجاج در آن اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری شده در کل آزمایش‌ها است.

جدول 2 مشخصات 5 قطعه‌ای که تنش‌های پسماند در آنها اندازه‌گیری شده است

Table 2 selected parts for residual stresses measurement

ردیف	ویژگی	نیرو (N)	حرارت ($^{\circ}\text{C}$)	اعوجاج (μm)
1	بیشترین نیرو و اعوجاج	269	149	95.63
2	کمترین نیرو	30	121	31.78
3	بیشترین حرارت	101	203	68.12
4	کمترین حرارت	76	89	39.64
5	کمترین اعوجاج	44	111	25.87

کوئنچ شده در آب به $117.25\mu\text{m}$ 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 در آب کاهش یافته است و به ترتیب میزان اعوجاج 36.17 و $44.72\mu\text{m}$ برای آنها ثبت گردیده است. نتایج به دست آمده رابطه مستقیم تنش پسماند با اعوجاج را نشان می‌دهد.

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 ماشین‌کاری قطعات به ابعاد نهایی، در حدود 90 درصد مواد برداشته شده است که موجب عدم تعادل تنش‌های موجود در قطعات می‌گردد. 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 ماشین‌کاری بیشتر شده و در نتیجه میزان اعوجاج و ناپایداری ابعادی قطعات افزایش می‌یابد.

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 ماشین‌کاری تولید گردید و نیرو، حرارت و اعوجاج در کلیه قطعات اندازه‌گیری 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.

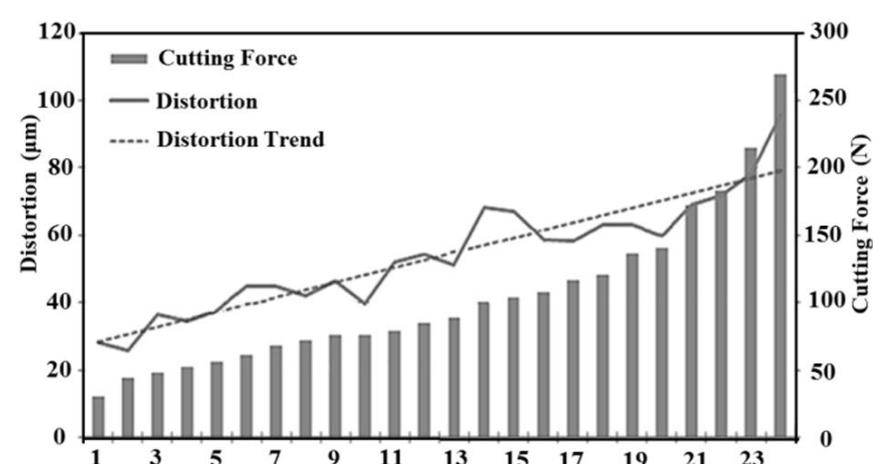


Fig. 9 The variations of the distortion with increase in the machining force

شکل 9 نمودار نیرو - اعوجاج

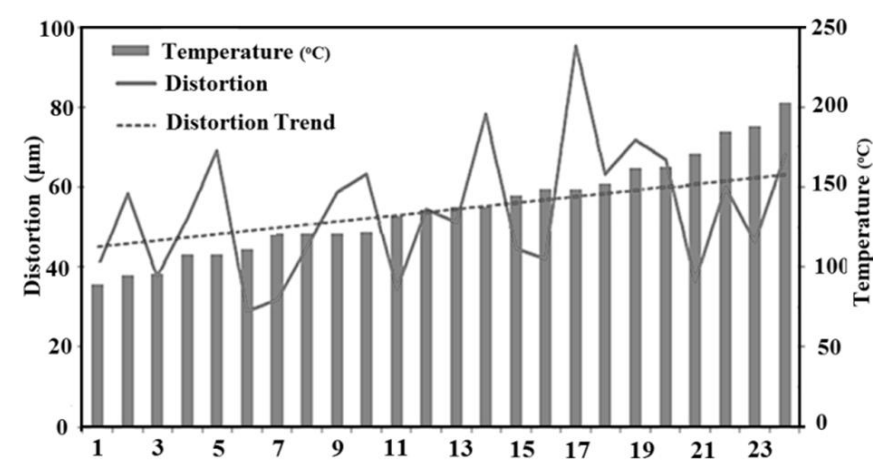


Fig. 10 The variations of the distortion with increase in the temperature

شکل 10 نمودار حرارت - اعوجاج

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 ماشین‌کاری نسبت داد. در ماشین‌کاری 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 تنش‌های 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 ماشین‌کاری نمایش می‌دهد. همان‌گونه 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 می‌شود که موجب انبساط موضعی و به وجود آمدن تنش‌های پسماند در سرتاسر قطعه کار می‌گردد. با افزایش حرارت در ناحیه برش، حرارت منتقل شده به قطعه کار نیز افزایش یافته است. این مطلب را به خوبی می‌توان از دو تصویر موجود در شکل 12 مشاهده نمود.

4-3- ارتباط توزیع 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 اندازه‌گیری شده و میزان آن نشان داده شده است که بیشترین مساحت محصور متعلق به قطعه شماره 1 به میزان 115.05 cm^2 و کمترین آن متعلق به قطعه شماره 2 به میزان 51.37 cm^2 بوده است.

در شکل 14 با استفاده از یک نمودار دو ستونه ارتباط مساحت محصور و میزان اعوجاج قطعات بررسی شده است. ر این نمودار مساحت زیر نمودار 5 قطعه به ترتیب از کمترین به بیشترین نشان داده شده است و با استفاده از یک نمودار خطی، اعوجاج متناظر با آن نیز نمایش داده شده است. همان‌گونه که در نمودار مشخص است در یک روند کلی با افزایش مساحت زیر نمودار، میزان اعوجاج قطعات افزایش یافته است. با این وجود شیب افزایش اعوجاج قطعات نسبت به افزایش مساحت یکسان نبوده است. به طور مثال با وجود اینکه در قطعه شماره 2 مساحت مقدار کمی افزایش یافته است، میزان اعوجاج نسبت به قطعه شماره یک کاهش یافته است. همچنین با مقایسه قطعات شماره 4 و 5 در جدول، علارغم اختلاف کم مساحت در این دو قطعه،

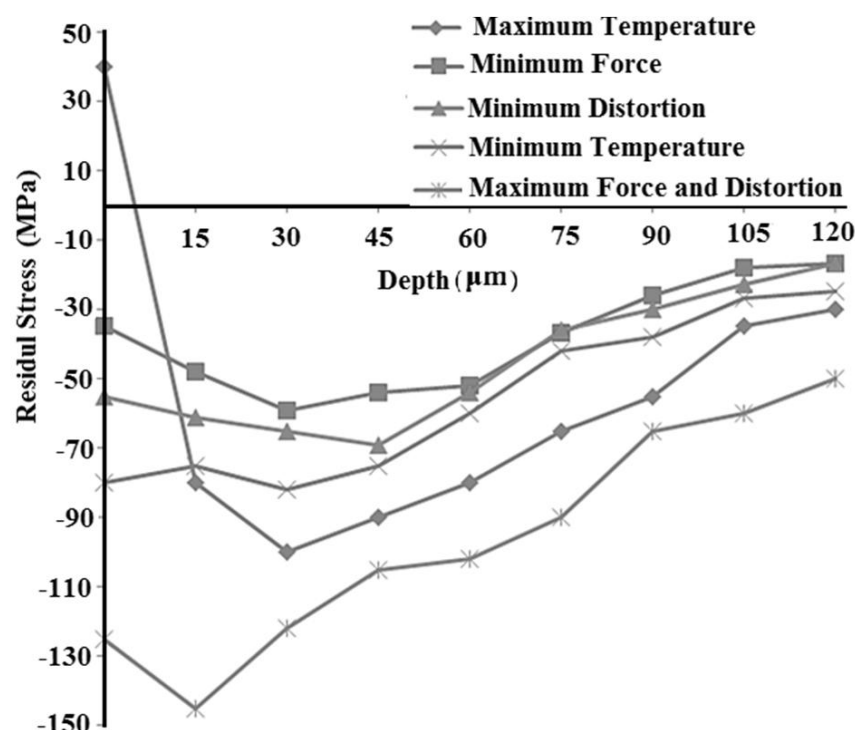


Fig. 11 Distribution of residual stresses in tangential direction in the parts

شکل 11 توزیع تنش‌های پسماند جهت مماسی در پنج قطعه اندازه‌گیری شده

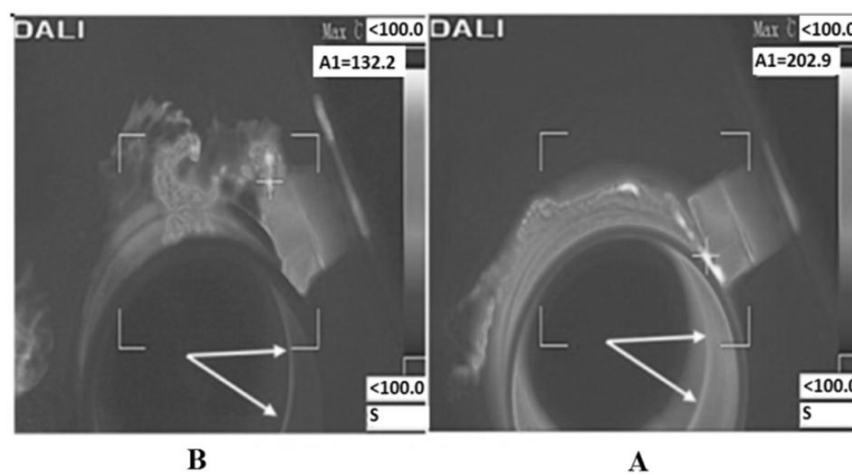


Fig. 12 Transfer of some part of generated temperature to the machined surface and generating a thermal gradient

شکل 12 انتقال بخشی از حرارت ایجاد شده در ناحیه برش به سطح ماشین‌کاری 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 اندازه‌گیری شده نمایش داده شده است. در این شکل با مقایسه نمودارهای توزیع تنش‌پسماند در آزمایش‌هایی که کمترین و بیشترین نیرو در آنها ثبت شده است به خوبی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نیرو، سطح تنش‌ها به شدت افزایش یافته است. در هردو نمودار شماره 1,2 (کمترین و بیشترین نیرو) کلیه تنش‌های اندازه‌گیری شده، از نوع فشاری بوده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نیرو و به طبع آن افزایش فشار و تغییر شکل پلاستیک در لایه‌های سطحی موجب افزایش مقدار و عمق تنش‌های پسماند شده 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 ماشین‌کاری، تنش‌ها از سطح پایینی برخوردار بوده‌اند. با مقایسه نمودارهای مربوط به کمترین و بیشترین میزان حرارت، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش حرارت نیز سطح تنش‌ها افزایش یافته و همچنین نحوه توزیع آنها نیز تغییر کرده است. در نمودار شماره 3 که بیشترین حرارت به میزان 203°C اندازه‌گیری شده است، حالت توزیع تنش با چهار قطعه دیگر متفاوت بوده است. در این قطعه در سطح تنش‌های کششی ایجاد شده و با افزایش 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 تنش 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

4- نتیجه‌گیری

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

در صورتی که سطح تنش‌های ناشی از کوئنچ در یک قطعه بالا باشد، حتی با انتخاب بهینه‌ترین شرایط ماشین‌کاری نیز، نرخ اعوجاج بالا خواهد بود. این موضوع در ماشین‌کاری قطعه کوئنچ شده در آب اثبات گردید. در این قطعه با وجود انتخاب یک استراژی ماشین‌کاری مناسب، به علت وجود سطح بالای از تنش در قطعه خام، میزان اعوجاج قطعه کار بسیار بالا بوده است و به میزان $117.25\mu\text{m}$ ثبت شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های 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 می‌بایست از سطح تنش‌های پسماند در مواد اطمینان حاصل نمود و در صورت ضرورت قبل از انجام ماشین‌کاری، قطعات را با روش کوئنچ پلیمری تحت عملیات حرارتی قرار داد.

از طرف دیگر انتخاب مناسب‌ترین پارامترهای ماشین‌کاری جهت دستیابی به قطعات بدون اعوجاج، ضروری است. بر اساس نتایج آزمایش‌های ماشین‌کاری، حتی در یک قطعه تنش زدایی شده، در صورتی که شرایط ماشین‌کاری بهینه نباشد، نرخ اعوجاج قطعات بالا خواهد بود. در طی آزمایش‌ها در یکی از قطعات که ابتدا تنش زدایی شده و سپس ماشین‌کاری شده است، به علت اعمال نیرو و حرارت بالا به قطعه کار و ایجاد سطح بالایی از تنش پسماند، اعوجاجی به بزرگی $95.63\mu\text{m}$ اندازه‌گیری شده است. بنابراین می‌توان گفت مهمترین اصل در کاهش تنش‌های پسماند ناشی از ماشین‌کاری و کاهش پتانسیل اعوجاج، کاهش نیروها و حرارت اندازه‌گیری در طی ماشین‌کاری است که می‌بایست با انتخاب استراتژی‌های مختلف این هدف تامین 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.

میزان اعوجاج تفاوت چشم‌گیری 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) اندازه‌گیری 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 ماشین‌کاری 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 می‌تواند 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 می‌توان گفت که با تنش‌زدایی قطعات قبل از ماشین‌کاری نهایی، سطح تنش‌ها به ویژه تنش‌های سطحی که در معرض حرارت مستقیم بوده‌اند به طور قابل توجهی کاهش یافته است و قطعه کار قبل از ماشین‌کاری نهایی از لحاظ تنش‌های داخلی به تعادل رسیده است. انجام ماشین‌کاری بر روی قطعات، منجر به اعمال سطح بالایی از تنش‌های پسماند در قطعه کار می‌شود که موجب از بین رفتن تعادل تنش‌های پسماند کششی و فشاری داخل قطعه کار می‌گردد. عدم تعادل تنش‌های داخلی موجب تغییر شکل و ناپایداری ابعادی قطعه کار تا ایجاد تعادل مجدد می‌شود. 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 ماشین‌کاری شده به وجود می‌آید.

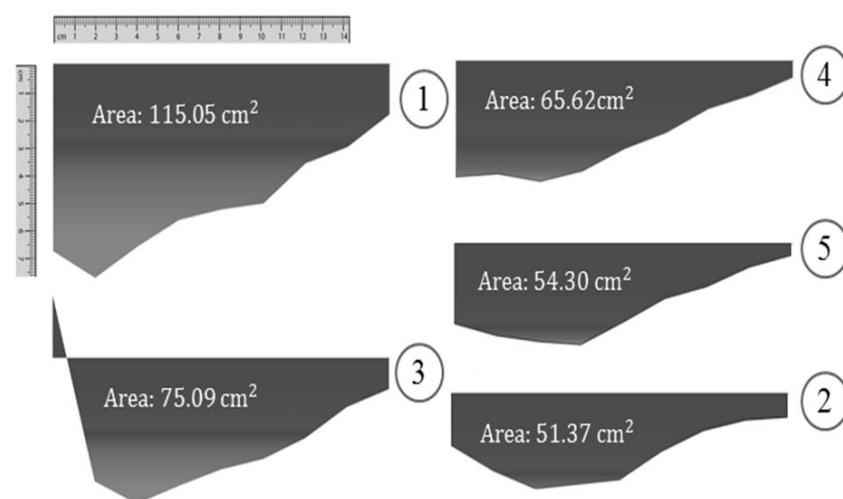


Fig. 13 The enclosed area in five stress diagrams

شکل 13 مساحت محصور در پنج نمودار تنش با در نظر گرفتن یک مقیاس طولی در دو محور افقی و عمودی

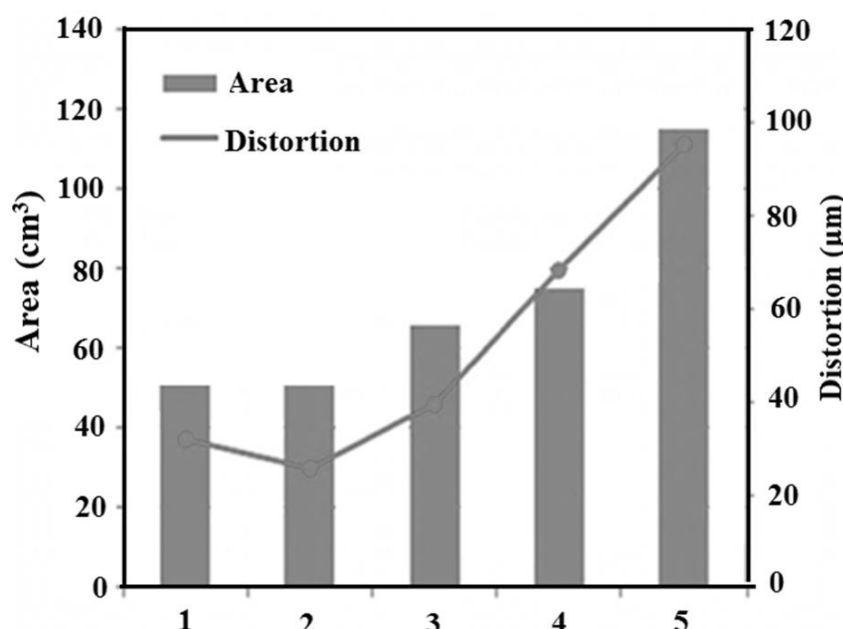


Fig. 14 The relationship of enclosed area with distortion level

شکل 14 نمودار اعوجاج- مساحت محصور نمودار تنش

- [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 heat-treated 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 machining-induced 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.