مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دوره 15، شماره 12، ص‌ص 295-302

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی و شبیه‌سازی اثر پارامترهای سوراخ‌کاری اصطکاکی بر طول بوش در ورق فولاد زنگ‌نزن AISI 304

سجاد خیشه[1]، حسین امیرآبادی[2*]، سیدمحمدحسین سیدکاشی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق‌پستی 97175/376، hamirabadi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 مهر 1394

پذیرش: 03 آبان 1394

ارائه در سایت: 09 آذر 1394

کلید واژگان:

فولاد زنگ‌نزن AISI 304

سوراخ‌کاری اصطکاکی

طراحی آزمایش

شبیه‌سازی اجزای محدود

چکیده

سوراخ‌کاری اصطکاکی یکی از روش‌های غیرمرسوم ولی کاربردی برای ایجاد و شکل‌دهی سوراخ در ورق‌های نازک است. در این روش یک ابزار چرخان در ورق نفوذ کرده و در یک مرحله بدون ایجاد براده ضمن سوراخ کردن ورق، یک بوش در طرف دیگر ایجاد می‌کند. ابزار مورد استفاده در این روش دارای شکل مخروطی و بدون لبه برنده است و از حرارت ایجاد شده بر اثر اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار، برای نرم کردن ماده، نفوذ به قطعه‌کار و ایجاد بوش استفاده می‌شود. در این فرآیند، درجه حرارت قطعه کار هنگام عملیات بالا و به تبع آن میزان شکل‌دهی نیز زیاد است؛ بنابراین شبیه‌سازی به روش اجزای محدود، ابزار مناسبی برای درک جریان ماده، تنش، کرنش و طول بوش است. در این مقاله از نرم‌افزار اباکوس برای شبیه‌سازی رفتار فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی استفاده شد. برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، طول بوش ایجادشده توسط ابزار با قطرهای مختلف در سرعت‌های پیشروی و دورانی متفاوت اندازه‌گیری و با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه شدند. هدف این تحقیق تعیین پارامترهای فرآیند برای ایجاد بوش با ضخامت یکنواخت و بررسی تأثیر آن‌ها بر فرم بوش است. دراین راستا، طراحی آزمایش با روش عاملی کامل صورت گرفت و نتایج با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس تفسیر گردید. مشخص شد که بیشترین تأثیر بر طول بوش ایجاد شده در سوراخ‌کاری اصطکاکی را ابتدا قطر ابزار با 94% تأثیر، سپس سرعت پیشروی با 3% و در نهایت کمترین اثر را سرعت دورانی با 2% تأثیر داراست.

Experimental investigation and simulation of the effects of friction drilling parameters on length of bush in stainless steel AISI304 sheet

Sajad Khisheh[1], Hossein Amirabadi[*], Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 October 2015
Accepted 25 October 2015
Available Online 30 November 2015

Keywords:
Stainless steel AISI 304
Friction drilling
Design of experiment
Finite element simulation

ABSTRACT

Friction drilling is a nontraditional hole-making process used to create and form the holes in thin sheets. The process involves penetration of a rotating conical tool into a sheet metal work piece and creation of a bushed hole in a single step. The tools are conical without having cutting edges, and the heat caused by friction between the tool and work piece is used to soften the material, penetrate into the work piece and make the bush. In this process, the temperature is high, and so, the deformation. The simulation by finite element analysis is a useful tool for understanding the material flow, stress, strain and length of bush. In this research, Abacus software was used to simulate the behavior of friction drilling. To verify the simulation results, the length of bushes created by tools with different diameters at different rotational speeds and federate was measured, and results were compared with experimental data. The aim of this study was to determine the process parameters to provide the bush with a uniform thickness, and study their effect on the shape of bush. Therefore, DOE was performed using a full factorial method and results were interpreted using ANOVA. Results showed that the tool diameter has the greatest effect (95%) on the length of bush during friction drilling, then feed rate (3%) and finally rotational speed (2%) has the smallest effect.

1- مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در صنعت مونتاژ ورق‌های فلزی و فرم‌های جدار نازک، چگونگی و استحکام اتصال مکانیکی آن‌هاست؛ بنابراین برای حل این مشکل به دنبال راه‌کاری ساده، کارآمد و مقرون به صرفه هستند. برای این امر روش‌های متداولی وجود دارد مانند اضافه کردن اتصالات به کمک جوش‌کاری یا استفاده از رزوه و اتصالات پیچی. یکی از راه‌حل‌های موجود برای اتصال ورق‌های جدارنازک و یا ایجاد بوش برای رزوه‌تراشی روی آن‌ها، استفاده از روش سوراخ‌کاری اصطکاکی است. سوراخ‌کاری اصطکاکی با نام‌های دیگری

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. Khisheh, H. Amirabadi, S. M. H. Seyedkashi, Experimental investigation and simulation of the effects of friction drilling parameters on length of bush in stainless steel AISI304 sheet, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 12, pp. 295-302, 2015 (in Persian)

مانند شکل‌دهی اصطکاکی سوراخ، سوراخ‌کاری حرارتی، سوراخ‌کاری فرم و سوراخ‌کاری جنبشی اصطکاکی نیز شناخته می‌شود. به کمک این روش، هم‌زمان با سوراخ‌کاری ورق جدار نازک، یک بوش یکنواخت نیز روی آن تشکیل می‌شود. هدف از ایجاد این بوش افزایش ضخامت برای ایجاد امکان قلاویزکاری و مهار نیرو است [1]. سوراخ‌کاری اصطکاکی فرآیندی تمیز و بدون براده است.

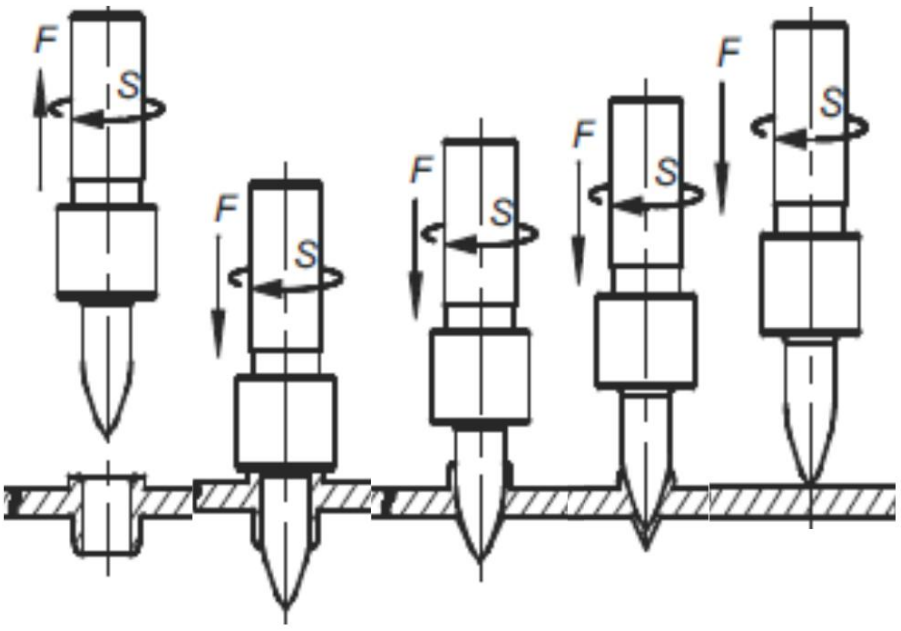
در روش معمول برای ایجاد یک سوراخ در قطعات کار، جرمی از ورق در ناحیه سوراخ‌کاری به صورت براده برداشته می‌شود. به طور کل در اتصال ورق‌ها بهتر است که جرم ورق در ناحیه سوراخ‌کاری باقی بماند تا با فرم‌دادن آن به صورت بوش در پشت ورق، اتصال مستحکمی در آن ناحیه ایجاد شود. مراحل اصلی فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی در شکل 1 نشان داده شده است.

اصطکاک روی سطح تماس که بر اثر نیروی محوری و سرعت زاویه‌ای نسبی بین ابزار و قطعه کار به وجود آمده، سبب تولید حرارت (حدود 1070 تا 1270 درجه کلوین) و در نتیجه نرم شدن قطعه کار می‌گردد. نوک ابزار هر دو حرکت شعاعی و محوری مته را پشتیبانی می‌کند؛ بنابراین قادر است شکاف سوراخ را بر قطعه کار نرم‌شده ایجاد و سپس به داخل قطعه کار نفوذ کند. در آخر با حرکت ابزار به جلو یک بوش استوانه‌ای ایجاد و فرایند کامل می‌شود.

تحقیقات پیشین بر این موضوع نشان می‌دهد که در بررسی‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی انجام شده، بیشتر به تأثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آلیاژهای الومینیوم، منگنز و فولاد زنگ‌نزن در سوراخ‌کاری اصطکاکی پرداخته شده است. کراوس‌کاس و همکاران [2] به تجزیه و تحلیل تجربی و شبیه‌سازی عددی فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی در فولاد زنگ‌نزن فولاد AISI 304 پرداختند و تغییرات نیروی محوری و گشتاور را به‌صورت تجربی به‌دست آوردند و با نتایج شبیه‌سازی المان محدود مقایسه کردند، اما تأثیر پارامترهای فرایند و ابزار روی طول بوش ایجادشده و مقایسه آن با شبیه‌سازی عددی را گزارش نکردند. بخش اصلی پژوهش‌های انجام شده بر فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی فولاد زنگ‌نزن، بررسی تجربی و آنالیز نیرو و گشتاور سوراخ‌کاری همراه با سختی سطح بوش و پوشش ابزار بوده است [4,3]. بررسی‌ها نشان داد که شبیه‌سازی عددی این فرایند به عامل‌های مختلفی از جمله خصوصیات ورق، روش سوراخ‌کاری، پارامترهای هندسی ابزار و ورق بستگی دارد؛ بنابراین برای هر ماده جدید، پیچیده و مخصوص است. نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که مقدار سختی ورق در راستای موازی با محور بوش، تقریبا یکسان است و میزان سختی فقط در سطح ورق افزایش پیدا می‌کند که ناشی از تغییرات حرارتی و مقدار تغییر شکل است [5]. میلر [6,1] در زمینه سایش ابزار در فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی تحقیقاتی انجام داد و به این نتیجه رسید که با افزایش دمای قطعه، نیروی محوری و گشتاور کاهش می‌یابد.

در تحقیقات کریشنال [7] مشخص شد که نیروی فشاری بالا مطلوب نیست، زیرا سبب تغییرشکل شدید ورق شده، عمر ابزار را کاهش می‌دهد. خم شدن ورق نشان‌دهنده نیروی فشاری بالاست. نوک تیز ابزار در اثر نیروی فشاری در قطعه نفوذ می‌کند و تغییرات در رنگ سوراخ نشان‌دهنده حرارت تولیدی در سرعت‌های دورانی مختلف است.

نتایج آماری به‌دست آمده توسط لیانگ‌کو [8] نشان می‌دهد که زاویه مخروط و سرعت دوران محور پارامترهای مؤثری هستند که زبری سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهند. وقتی زاویه مخروط کمینه مقدار را اختیار کند،



(e) (d) (c) (b) (a)

Fig. 1 Friction drilling procedure, a) initial contact, b) penetration, c) material flow, d) bush forming, e) tool retract [2]

شکل 1 مراحل سوراخ‌کاری اصطکاکی: الف)تماس اولیه، ب) نفوذ نوک ابزار در ورق، پ) جریان مواد و شکل دهی سوراخ، ت) شکل دهی بوش، ث) برگشت ابزار [2]

طول منطقه تماس ابزار افزایش می‌یابد؛ بنابراین دمای بالاتری در سطح منطقه سوراخ‌کاری ایجاد می‌شود در نتیجه زبری سطح کمتری در دیواره سوراخ ایجاد می‌شود. کراوس‌کاس [9] نتیجه‌گیری کرد که بیشترین مقدار نیرو هنگام عبور قسمت مخروطی ابزار از ورق به وجود می‌آید و پس از آن مقدار نیرو کاهش می‌یابد، اما هم‌زمان گشتاور دارای روند افزایشی است.

پانتوانا [10] به این نتیجه رسید که سرعت دوران اثر قابل توجهی بر کیفیت سطح بوش دارد، اما کمترین اثر را بر انحراف ابعاد بوش تولید شده دارد. گوپیچند و همکاران [11] با استفاده از نرم‌افزار انسیس فرآیند سوراخ‌کاری اصطکاکی را برای آلومینا شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل کردند. ایشان به بررسی کرنش‌های الاستیک، تنش و تغییرشکل مواد در سوراخ‌کاری اصطکاکی پرداختند. سارا و همکاران [12] با استفاده از روش تاگوچی و منطق فازی پارامترهای فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی بر روی فولاد زنگ نزن را بهینه سازی کردند.

موضوع اصلی بسیاری از تحقیق‌ها یافتن شرایط بهینه پارامترهای فرآیند برای ایجاد بوش در ورق‌ها و تأثیر این پارامترها روی خواص بوش بوده است. تأثیر برخی از پارامترها نظیر نیروی محوری، سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر روی خواص بوش بررسی شده، اما تأثیر پارامترهای فرایند و ابزار روی طول بوش ایجاد شده و مقایسه آن با شبیه‌سازی عددی تاکنون گزارش نشده است. از این رو در تحقیق حاضر، با استفاده از طراحی آزمایش علمی به روش عاملی کامل، تأثیر این پارامترها روی طول بوش ایجادشده برای ورق از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 304 به‌صورت تجربی و عددی بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی فرایند به روش مکانیکی- حرارتی انجام شده و طول بوش در نرخ پیشروی، سرعت و قطرهای مختلف ابزار استخراج شده است. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای طول بوش، تطابق خوبی را بین آن‌ها نشان می‌دهد. نتایج حاصل با استفاده از تحلیل آماری آنالیز واریانس مورد بحث و تفسیر قرار گرفته است.

2- شبیه‌سازی عددی فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی

2-1- فرمول‌بندی روش المان محدود حرارتی - مکانیکی

حرارت ایجادشده توسط اصطکاک و تغییرشکل پلاستیکی، درجه حرارت

قطعه کار را افزایش می‌دهد. این حرارت، قطعه کار را نرم‌کرده و به ماده اجازه جریان یافتن و شکل‌گیری سوراخ و بوش را می‌دهد. معادلات مدل گرمایی به شکل رابطه (1) است [13].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right] + G \quad (1)$$

در این‌جا ρ دانسیته، c گرمای ویژه، k هدایت حرارتی، T درجه حرارت، t زمان، G نرخ تولید گرما و x، y، و z مختصات فضایی است. ρ، c، و k تابع درجه حرارت هستند، که برای دقت در مدل کردن گرمایی مهم است. T و G توابعی از x، y، z و t می‌باشند. نرخ تولید گرما در سوراخ‌کاری اصطکاکی شامل حرارت تولید شده توسط اصطکاک بین ابزار و قطعه کار $\dot{q}_f$ و حرارت تولید شده از تغییرشکل پلاستیکی برگشت‌ناپذیر در داخل قطعه کار $\dot{q}_p$ به صورت رابطه (2) است [14].

$$G = \dot{q}_f + \dot{q}_p \quad (2)$$

با توجه به کمتر بودن تنش برشی ناشی از اصطکاک، نسبت به تنش تسلیم برشی ماده، از چسبندگی ماده به قطعه کار و حرارت تولیدی ناشی از آن صرف‌نظر شده و بین سطح ابزار و ورق شرایط لغزش در نظر گرفته شده است [15]. مقدار تنش تسلیم برشی ماده از رابطه (3) به‌دست می‌آید.

$$\tau_{\text{yield}} = \frac{\sigma_{\text{yield}}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

در این تحقیق فرض شد که اصطکاک بین ابزار و قطعه کار از قانون کولمب تبعیت می‌کند. با ضریب اصطکاک μ، نیروی اصطکاک F_f متناسب با نیروی نرمال F_n است ($F_f=\mu F_n$). نرخ تولید گرمای اصطکاکی برابر است با رابطه (4):

$$\dot{q}_f = 2\pi R N \mu F_n \quad (4)$$

که R شعاع و N سرعت چرخشی ابزار است. نرخ تولید گرما را می‌توان به صورت رابطه (5) نوشت.

$$\dot{q}_p = \eta \sigma \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (5)$$

در این‌جا η بخش حرارت غیر الاستیکی، σ تنش مؤثر و $\dot{\varepsilon}^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیکی هستند [16]. در سوراخ‌کاری اصطکاکی اغلب انرژی بخش الاستیک در تغییرشکل‌های پلاستیکی زیاد، کم است [18,17].

2-2- مدل‌سازی

برای شبیه‌سازی مکانیکی- حرارتی فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی از نرم‌افزار اباکوس/ صریح نسخه 6.10 استفاده شد. شبیه‌سازی سه‌بعدی نسبت به دوبعدی ترجیح داده می‌شود، زیرا در سه بعد می‌توان جریان قطعه کار در مسیر چرخش را تعیین کرد. نوع صریح برای حل مسائل با تغییر شکل زیاد که نیازمند نموهای بسیار کوچک، مناسب است. در این شبیه‌سازی برای همگرا شدن حل از سه شیوه، مش تطبیقی[1]، حذف المان[2] و جرم انباشته[3] استفاده شد. مش تطبیقی و حذف المان در تغییر شکل‌های زیاد، کیفیت مش قطعه را با معیار کرنش پلاستیک حفظ می‌کنند [19,11,2].

برای انجام شبیه‌سازی ابتدا فرآیند به صورت یک کوپل حرارتی- مکانیکی معرفی شده و از المان C3D8RT که یک المان مربعی هشت گره‌ای است، برای تحلیل استفاده شده است. با این روش می‌توان کرنش‌ها، نرخ کرنش و حالت تغییرشکل را برای کوچک‌ترین جزء از جسم به صورت موضعی توصیف کرد. در این شبیه‌سازی، قطعه کار استوانه‌ای به عنوان یک مدل الاستو- پلاستیک و ابزار به‌صورت صلب درنظر گرفته می‌شود که با مشخص کردن ابعاد المان‌ها و ناحیه‌بندی مناسب مش‌بندی می‌شوند.

مدل اجزای محدود فرایند در شکل 2 نشان داده شده است. قطعه کار دارای قطر 20 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر است. نمونه مدل‌سازی عددی، مطابق با نمونه استاندارد تجربی است. گره‌های محیطی قطعه کار در تمام جهات مقید و سطح بالای قطعه کار تحت جریان همرفت با ضریب همرفت 30 $W/m^2{}^\circ c$ و درجه حرارت محیط 20 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. در شکل 2 مش‌های المان محدود ابتدایی شامل 23992 المان و 25905 گره است. با توجه به تولید بوش و حرارت شکل‌دهی هر گره دارای 4 درجه آزادی، 3 درجه آزادی فضایی در جهات x، y، z و یک درجه آزادی برای درجه حرارت است (شکل 3).

روش مش‌بندی ALE که در تحقیق کنونی به‌کار گرفته شده است ترکیبی از روش‌های اولر و لاگرانژ است که جهت کسب مزایای هر دو روش به‌کار رفته است. این روش یک ابزار قوی برای بهبود مش در مسائل با تغییر شکل بزرگ است. در این روش مش به‌صورت آزادانه در تمام مواد حرکت می‌کند یعنی المان ها نه به ماده متصل هستند و نه در فضا ثابت می‌مانند. نتایج شبیه‌سازی به اندازه مش بسیار حساس است. گرادیان کرنش پلاستیک در فصل مشترک بسیار بالاست؛ بنابراین اگر مش‌بندی خشن باشد، تعداد زیادی از المان‌ها به شدت اعوجاج پیدا می‌کنند و حذف می‌شوند. در نتیجه بوش ایجاد شده شکل نامناسبی پیدا می‌کند. در مقابل اگر مش‌بندی خیلی ریز باشد، زمان شبیه‌سازی به شدت افزایش می‌یابد، ولی نتایج تغییری نمی‌کنند؛ بنابراین باید تعداد المان مناسبی را انتخاب کرد. در این پژوهش ابعاد المان‌ها براساس آنالیز حساسیت نسبت به اندازه مش 10×5 میکرومتر و، همچنین المان از نوع دمایی- جابه‌جایی و با مرتبه نمایی انتخاب شد.

برای تعریف خواص پلاستیک مواد، مدل جانسون- کوک[4]، که در رابطه (6) ارائه داده شده، به‌کار رفته است. مقدار ضرایب رابطه (6) و خواص فولاد زنگ‌نزن AISI 304، به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 آمده است [20].

$$\sigma_y = \left[A + B(\varepsilon_p)^n\right]\left[1 + C\left(\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}\right)^m\right] \quad (6)$$

که در آن، ε_p کرنش پلاستیک، $\dot{\epsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک، T دمای ماده، T_{melt} دمای نقطه ذوب ماده، σ_y تنش در دمای T هستند و سایر پارامترها در جدول 1 آمده است.

برای مدل کردن نفوذ ابزار داخل ورق باید معیار شکست تعریف شود. در این تحقیق از مدل شکست جانسون کوک براساس کرنش پلاستیک استفاده شد و شکست دینامیکی زمانی حادث می‌شود که معیار شکست (D) طبق رابطه (7) از 1 تجاوز کند.

$$D = \Sigma\left(\frac{\Delta\dot{\epsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}}\right) \quad (7)$$

کرنش شکت $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ با رابطه (8) تعیین می‌شود.

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})]\,[1 + d_4 \ln\frac{\varepsilon^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0})]\,[1 + d_5 \frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0}] \quad (8)$$

d_1-d_5 ثابت‌های ماده هستند که از داده‌های تجربی به‌دست می‌آیند و عبارت p تنش فشاری و q تنش فون‌مایزز است. مقادیر معیار شکست در جدول 3 آورده شده است.

اصطکاک بین ابزار و ورق در سوراخ‌کاری پدیده‌ای بسیار پیچیده است. در این مطالعه ضریب ثابت اصطکاک توسط قانون کلمب برابر 0.5 قرار داده

1- Adaptive meshing
2- Element deletion
3- Mass scaling
4- Johnson-Cook

شد. ضریب اصطکاک 0.5 نزدیک‌ترین نتایج به شبیه‌سازی را در بازه ضرایب 0.7-0.3 به‌دست داد.

3- روش آزمایش

3-1- فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی

ورق‌های مورد استفاده برای سوراخ‌کاری اصطکاکی، از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 304 به ضخامت 2 میلی‌متر و ابعاد 30×30 میلی‌متر است. خواص مکانیکی این آلیاژ در جدول 4 آمده است که مقادیر جدول از آزمون کشش استاندارد به‌دست آمدند.

برای سوراخ‌کاری اصطکاکی از ابزارهای شکل 4 از جنس آلیاژ تنگستن کاربید استفاده شده است. سوراخ‌کاری ورق‌ها با سرعت‌های دورانی و پیشروی

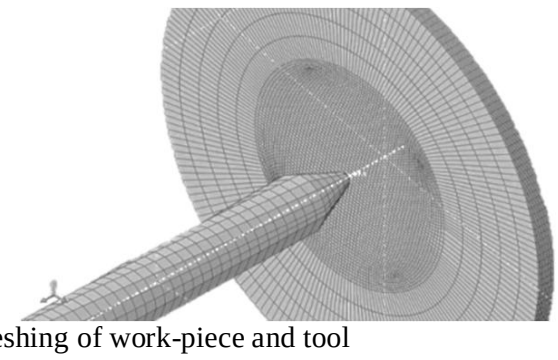


Fig. 2 Meshing of work-piece and tool

شکل 2 مش‌بندی قطعه کار و ابزار

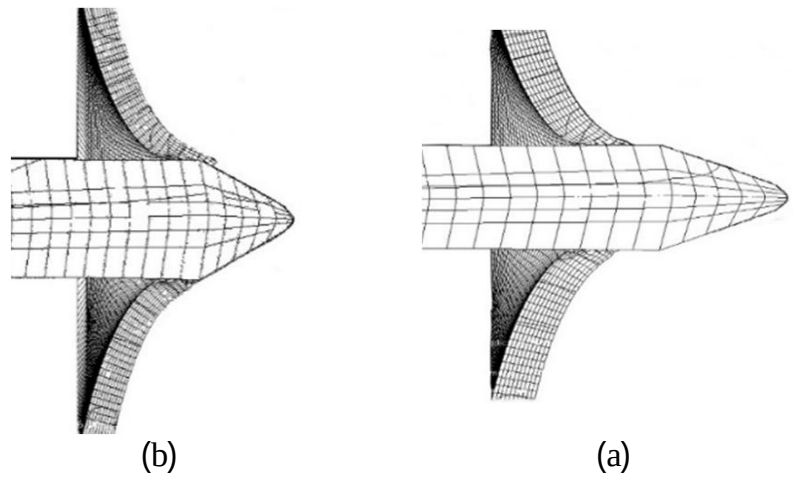


Fig. 3 Finite element simulation of the process with feed rate of 0.06 mm/min and rotational speed of 2000 rpm for tool diameter of a) 5mm and b) 6mm

شکل 3 شبیه‌سازی عددی فرایند با سرعت پیشروی 0.06 mm/min و سرعت دورانی 2000 rpm، الف) ابزار با قطر 5 mm، ب) ابزار با قطر 6 mm

جدول 1 ثابت‌های مدل ماده جانسون کوک برای فولاد زنگ‌نزن AISI 304 [2]

Table 1 Johnson-Cook constants for AISI304 stainless steel [2]

پارامتر	واحد	مقدار
دمای مرجع، T_{melt}	K	1673
دمای مرجع، T_{room}	K	1000
تنش تسلیم، A	MPa	280
ضریب استحکام، B	MPa	802.5
توان کرنش سختی، n	-	0.622
نمای دما، m	-	1.0
ضریب نرخ کرنش، C	-	0.0799
نرخ کرنش اولیه، $\dot{\varepsilon}_0$	1/s	1.0

جدول 2 خواص حرارتی فولاد زنگ‌نزن AISI 304 [2]

Table 2 Thermal properties of AISI304 stainless steel [2]

ضریب انبساط (10^{-6} K^{-1})	ضریب هدایت حرارتی (W/ m.K)	گرمای ویژه (J/kg/K)
17.8	16.2	452

جدول 3 پارامترهای شکست جانسون کوک برای فولاد زنگ‌نزن AISI 304 [2]

Table 3 Johnson-Cook fracture constants for AISI304 stainless steel [2]

پارامترهای معیار شکست	فولاد زنگ‌نزن AISI 304
$d1$	0.69
$d2$	0
$d3$	0
$d4$	0.0546
$d5$	0

مختلف و همچنین قطرهای مختلف ابزار انجام شد. با توجه به محدودیت دستگاه دریل، سرعت دورانی در بازه 1250 rpm تا 3000 و سرعت پیشروی ابزار در بازه 0.04 mm/min تا 0.08 انتخاب شدند. با توجه به کاربرد ورق، قطر مته نیز در بازه 8-5 میلی‌متر انتخاب شد.

سوراخ‌کاری با دستگاه دریل رادیال مدل Z3050×16I انجام شده است. ابتدا ورق فولادی در داخل گیره‌ها مقید می‌شود، سپس از یک قطعه چوبی به عنوان صفحه پشتیبان در زیر ورق استفاده می‌شود.

ابزار با زاویه 90 درجه نسبت به راستای افق در دستگاه دریل بسته می‌شود. هنگام تماس ابزار چرخان با قطعه کار، حرارت اصطکاکی ایجاد می‌شود. این حرارت، با حرارت تولید شده حاصل از تداخل مکانیکی فرایند و حرارت آدیاباتیکی درون قطعه کار ترکیب شده و موجب می‌شود تا مواد اغتشاش یافته، بدون رسیدن به نقطه ذوب نرم شوند؛ بنابراین حرکت انتقالی رو به پایین ابزار، درون ناحیه مومسانی فلز ممکن می‌شود. دوران و هندسه خاص ابزار، مواد مومسان را به پشت ورق هدایت می‌کند و با عبور ابزار از ورق این مواد مومسان شکل ابزار را به خود می‌گیرند و بوش اتصالی را ایجاد می‌کنند. شکل 5 مجموعه آماده‌سازی شده جهت انجام سوراخ‌کاری، یک نمونه بسته‌شده در گیره‌ها و نمونه سوراخ‌کاری‌شده را پس از اتمام فرآیند نشان می‌دهد. تمامی آزمایشات تجربی در شرکت شرق صنعت نیشابور انجام شده است.

3-2- طراحی آزمایش‌ها

پارامترهایی که در این آزمایش‌ها تأثیر آن بر طول بوش ورق‌های فلزی بررسی شده شامل قطر ابزار، سرعت پیشروی، سرعت دورانی است. در آزمایش‌های تجربی، از روش طراحی آزمایش به شیوه عاملی کامل استفاده شده است؛ بنابراین نخستین گام، مشخص کردن تعداد عوامل و سطوح آن‌هاست. عوامل در نظر گرفته شده در این تحقیق و سطوح آن‌ها در جدول

جدول 4 خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن AISI 304

Table 4 Mechanical properties of AISI304 stainless steel

دانسیته (N/m^3)	ضریب پواسون	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
8000	0.30	690	260	207.8

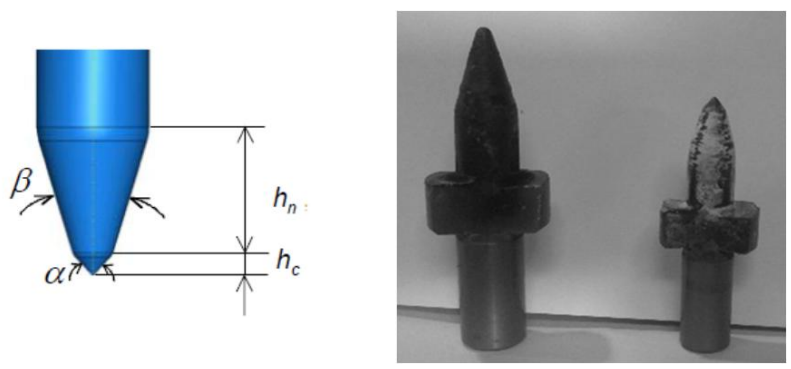


Fig. 4 Drilling tools with diameter of 8, 6 and 5 mm

شکل 4 ابزارهای سوراخ‌کاری به ترتیب از راست به چپ دارای قطر 5، 6 و 8 میلی‌متر

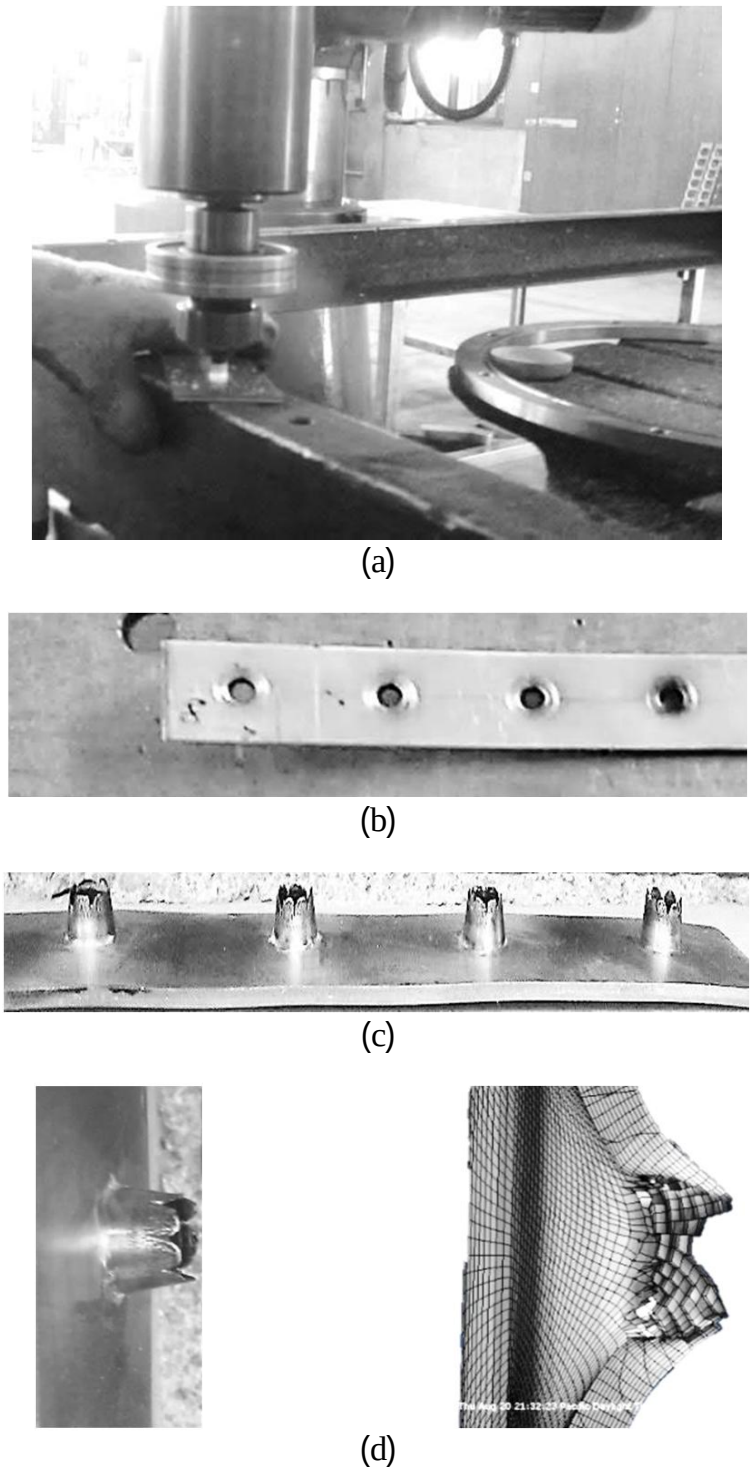


Fig. 5 a) experimental tool, b) a drilled sample, c) formed bush, d) comparison of numerical and experimental bushes

شکل 5 الف) ورق‌های در حال سوراخ‌کاری، ب) یک نمونه ورق سوراخ‌کاری شده، (ج) بوش ایجاد شده روی ورق، (د) مقایسه بوش شبیه‌سازی با تجربی

5 آورده شده است. تعداد نقاط طراحی برابر با $n=3^3=27$ آزمایش خواهد بود که تمام آن‌ها انجام گرفته است.

3-3- تعیین طول بوش

طول بوش نمونه‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری و ثبت شدند که نتایج در جدول 6 ارائه شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود نیز به‌دست آورده شد که تطابق خوبی بین نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی وجود داشت. طول بوش نمونه‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری مختصات[1] با دقت 0.001 میلی‌متر (شکل 6) اندازه‌گیری و ثبت شدند.

به دلیل تأثیر معیار حذف المان بر طول بوش این معیار باید به درستی انتخاب شود تا بتوان طول بوش را با خطای کمتری مدل‌سازی کرد. دلایل اصلی اختلاف بین مقادیر طول بوش مدل‌سازی و تجربی، یکی به دلیل وجود معیار حذف المان برای ادامه شبیه‌سازی در نرم‌افزار اباکوس و دیگری به دلیل شرایط اصطکاکی پیچیده بین سطح مته و ورق است که در مدل‌سازی این شرایط اصطکاکی به‌صورت ضریب اصطکاک ثابت کلمبی در نظر گرفته شد.

1- CMM

4- تحلیل نتایج

تمامی آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف سوراخ‌کاری برای تشکیل بوشی با خصوصیات مکانیکی مطلوب براساس طراحی آزمایش انجام شد. همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد، در سوراخ‌کاری اصطکاکی کیفیت بوش‌های تولید شده، به طور کل تابع پارامترهای فرایندی نظیر سرعت دورانی، سرعت پیشروی و همچنین هندسه ابزار است. بهینه‌سازی این پارامترها برای به‌دست آوردن بوش بی‌عیب با مشخصات عالی از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر عوامل مهم مؤثر در فرایند شامل دو پارامتر فرایندی (سرعت دورانی و سرعت پیشروی) و یک پارامتر ابزار (قطر ابزار) بر طول بوش است. برای رسیدن به این هدف، تمامی نتایج توسط نرم‌افزار مینی تب[2] تحلیل و به کمک نمودارهای آماری به دقت مورد بررسی قرار گرفت.

1-4- تحلیل واریانس نتایج

نتیجه‌گیری قطعی از نمودارهای ارائه‌شده در بخش بالا مستلزم تأیید اثرات نشان داده شده پارامترها با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار P می‌پردازد؛ بنابراین لازم است پیش از به‌کارگیری این تحلیل، فرضیه‌های این روش در مورد داده‌های آزمایشی این تحقیق بررسی شود. نمودار احتمال نرمال مقادیر

جدول 5 سطوح پارامترهای ورودی

Table 5 Input parameters levels

عامل‌ها	سطح یک	سطح دو	سطح سه
قطر ابزار mm	5	6	8
سرعت دورانی rpm	1250	2000	3000
سرعت پیشروی mm/min	40	60	80

جدول 6 طول بوش به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی و عددی

Table 6 Obtained bush lengths in experiments and simulations

قطر ابزار mm	سرعت دورانی rpm	سرعت پیشروی mm/min	طول بوش تجربی mm	طول بوش مدل‌سازی mm	درصد اختلاف %
5	1250	0.04	2.904	2.151	25
5	1250	0.06	2.677	1.9	26
5	1250	0.08	2.521	1.740	32
5	2000	0.04	3.024	2.332	22
5	2000	0.06	2.908	1.904	34
5	2000	0.08	2.785	1.814	34
5	3000	0.04	3.012	2.532	19
5	3000	0.06	2.876	2.297	23
5	3000	0.08	2.742	2.101	27
6	1250	0.04	3.691	2.913	21
6	1250	0.06	3.513	2.756	22
6	1250	0.08	3.350	2.442	28
6	2000	0.04	3.715	3.001	18
6	2000	0.06	3.560	2.758	22
6	2000	0.08	3.402	2.561	24
6	3000	0.04	3.947	3.343	15
6	3000	0.06	3.741	3.085	19
6	3000	0.08	3.550	2.778	20
8	1250	0.04	4.888	4.189	14
8	1250	0.06	4.639	3.981	14
8	1250	0.08	4.504	3.641	19
8	2000	0.04	5.245	4.780	8
8	2000	0.06	5.090	4.448	10
8	2000	0.08	4.942	4.004	19
8	3000	0.04	5.385	4.587	14
8	3000	0.06	5.080	3.904	22
8	3000	0.08	4.912	4.376	10

2- Minitab

باقی‌مانده در شکل 7 آورده شده است که از روی نمودار آن می‌توان گوسی بودن توزیع خطا را بررسی کرد. پراکندگی نقاط آزمایش در اطراف خط مورب، پیروی نتایج طراحی آزمایش صورت گرفته از مدل توزیع نرمال را نشان می‌دهد. نمودار مقادیر باقی‌مانده در برابر نقاط برازش‌یافته نیز در شکل 8 مشخص شده است. پراکندگی نقاط طراحی و عدم وجود یک ساختار منظم در نقاط این نمودار نشان‌دهنده ثابت بودن واریانس است. این دو شکل صحت فرض‌های نخستین تحلیل واریانس و در نتیجه صحت نتایج آن را تأیید میکنند. با اثبات صحت فرض‌های یادشده، می‌توان به نتایج تحلیل واریانس که در جدول 7 آورده شده اعتماد کرد. در این جدول، درجه آزادی، مجموع مربعات تنظیم‌شده و میانگین مربعات تنظیم یافته است. سطح اطمینان در این تحقیق برابر 95% انتخاب شده است. مقدار P کمتر از 0.05 نشان‌دهنده آن است که پارامتر متناظر تأثیری معنادار بر طول بوش دارد.

از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که بیشترین تأثیر بر طول بوش ایجاد شده در سوراخ‌کاری اصطکاکی را ابتدا قطر ابزار (95%)، سپس سرعت پیشروی (3%) دارد و کمترین تأثیر را نیز سرعت دورانی (2%) دارد. اثرات متقابل عامل ها نیز کمتر از یک درصد تأثیر داشتند.

4-2- تأثیر سرعت پیشروی

در فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی با افزایش سرعت پیشروی چون ماده مومسان فرصت کمتری برای شکل‌گیری دارد؛ بنابراین طول بوش کمتر

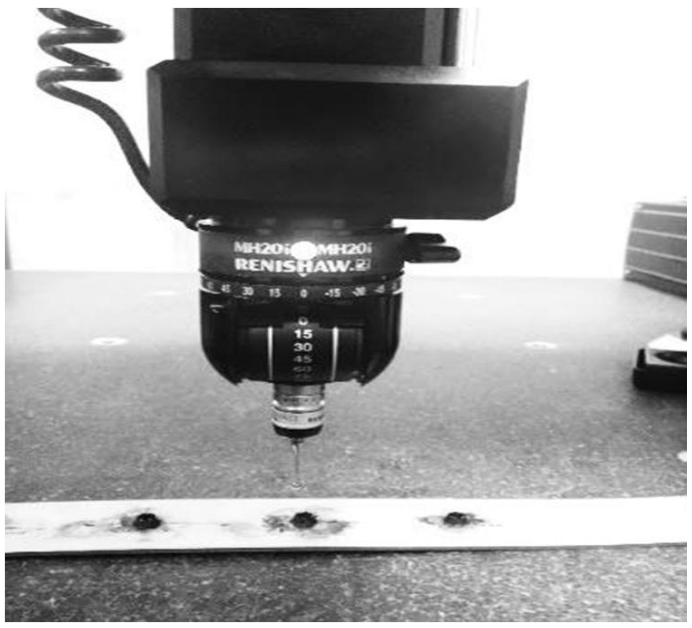


Fig. 6 Measurement of bush length by CMM

شکل 6 اندازه‌گیری طول بوش با دستگاه CMM

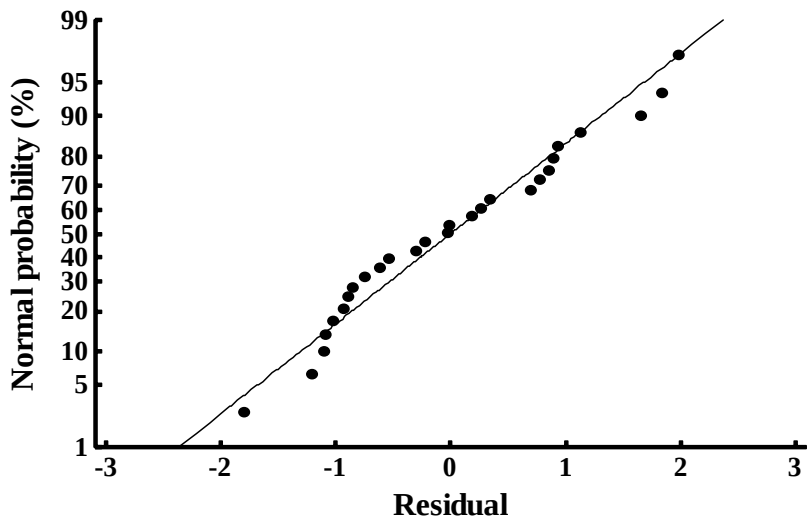


Fig. 7 Normal probability plot

شکل 7 نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی‌مانده

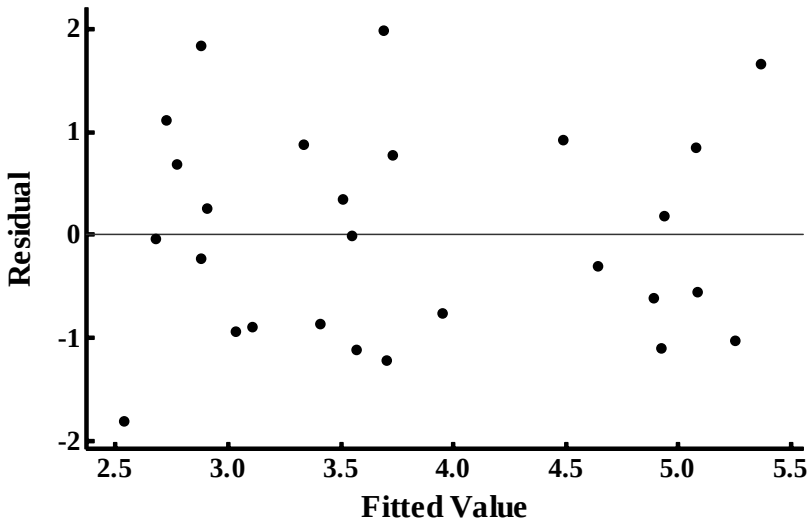


Fig. 8 Residual versus fitted value plot

شکل 8 نمودار مقادیر باقی‌مانده به مقادیر برازش‌یافته

جدول 7 جدول تحلیل واریانس برای طول بوش

Table 7 Analysis of variance table for bush length

منابع	درجه ازادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P	%
D	2	20.882	10.441	24407.9	0.000	95.16
V	2	0.421	0.210	492.91	0.000	1.92
F	2	0.569	0.284	665.79	0.000	2.6
$D\times V$	4	0.126	0.031	73.86	0.000	0.28
$D\times F$	4	0.004	0.001	2.45	0.131	0.00
$V\times F$	4	0.014	0.003	8.30	0.006	0.03

می‌شود. با توجه به تحلیل نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که با افزایش 50 درصدی سرعت پیشروی، طول بوش 5% کاهش می‌یابد. شکل 9 تأثیر سرعت پیشروی بر طول بوش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمانی که سرعت پیشروی کمتر باشد مدت زمانی که ابزار با قطعه کار در تماس است و همچنین کل مدت زمان نفوذ به قطعه افزایش می‌یابد. این موضوع سبب افزایش مقدار انرژی گرمایی تولید شده در اثر اصطکاک نیز می‌شود. مدت زمان بیشتر فرآیند سوراخ‌کاری فرصتی را فراهم می‌آورد تا ورق فولادی در محل ایجاد سوراخ، به وسیله انرژی گرمایی تولید شده نرم شده و حالت نیمه جامد (خمیری) خود را هنگام پیشروی ابزار حفظ کرده و در نتیجه میزان جابه‌جایی قسمت خمیری افزایش پیدا کرده و طول بوش ایجادشده افرایش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان گفت که با افزایش پیشروی جرم ورق تشکیل‌دهنده بوش فرصت کمتری برای شکل‌گیری دارد؛ بنابراین به صورت انباشته در می‌آید و به جای افزایش طول، ضخامت افزایش می‌یابد.

4-3- تأثیر سرعت دورانی

در فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی چرخش ابزار سبب ایجاد اغتشاش و ترکیب مواد با یکدیگر می‌شود. هر چه سرعت دورانی افزایش یابد، میزان حرارت ورودی به منطقه اغتشاش نیز افزایش خواهد یافت؛ بنابراین سرعت دورانی بالا منجر به افزایش دما در ناحیه سوراخ‌کاری به دلیل افزایش حرارت ناشی از اصطکاک می‌شود و بوش راحت‌تر شکل می‌گیرد. در نتیجه طول بوش نیز افزایش می‌یابد و در سرعت دورانی‌های بالاتر نرخ افزایش طول کاهش می‌یابد (شکل 10). در سرعت دورانی کم با افزایش 60 درصدی سرعت، طول بوش 8% افزایش خواهد یافت و در سرعت دورانی‌های بالاتر با افزایش 50 درصدی سرعت، طول بوش تنها 2% افزایش طول خواهد داشت. این پدیده می‌تواند به دو دلیل زیر بیان شود:

- با افزایش سرعت دورانی به دلیل افزایش سطح مناطق انتقال یافته از حالت اصطکاکی چسبنده به لغزنده و تأثیر ان بر تولید حرارت، نرخ افزایش طول بوش روند کاهشی پیدا می‌کند، در واقع ضریب اصطکاک زمانی که ذوب موضعی اتفاق می‌افتد کاهش می‌یابد.
- گرمای نهان مقداری از حرارت تولید شده را جذب می‌کند. با افزایش سرعت دورانی حرارت تولید شده از اصطکاک افزایش می‌یابد که این سبب اغتشاش بیشتر مواد می‌شود. زمانی که سرعت دورانی از 1250 به 2000 دور بر دقیقه می‌رسد طول بوش افزایش می‌یابد و این نرخ افزایش در سرعت بالای 2000 دور بر دقیقه کاهش می‌یابد. سرعت دورانی بالاتر سبب ایجاد حرارت بیشتر و در نتیجه راه یافتن مواد مومسان به قسمت بالای ورق می‌شود که این خود سبب ایجاد جای خالی در منطقه اغتشاش می‌شود. همچنین در نتیجه گرمای زیاد تولید شده سرعت سرد شدن کاهش می‌یابد و جای خالی‌ها در 3000 دور بر دقیقه در مقایسه با سرعت دورانی 2000 دور بر دقیقه کاهش می‌یابند که سبب بهبود لبه بوش و پر شدن بهتر دره‌های گلبرگ بوش می‌شود و در نتیجه نرخ افزایش طول بوش کاهش می‌یابد.

4-4- تأثیر قطر ابزار

هندسه ابزار نقش بسیار مهمی در جریان مواد و تولید حرارت در سوراخ‌کاری اصطکاکی بازی می‌کند. اصطکاک بین ابزار و سطح نمونه بیشترین بخش از حرارت مورد نیاز برای سوراخکاری را تأمین می‌کند. قطر ابزار با میزان حرارت تولیدی در حین فرآیند رابطه مستقیم دارد و از مهم‌ترین متغیرهای فرایند سوراخکاری اصطکاکی است که میزان حرارت ورودی میانگین به منطقه اغتشاش را تعیین می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که با افزایش تقریبا 20 درصدی قطر ابزار، طول بوش 25% افزایش می‌یابد (شکل 11). این به دلیل این است که با افزایش قطر ابزار سطح تماس با ورق افزایش می‌یابد؛ بنابراین در نتیجه تولید حرارت بیشتر طول بوش نیز افزایش می‌یابد. تغییر شیب افزایش طول بوش با افزایش قطر بوش پس از قطر ابزار 6 میلی‌متر به این دلیل است که با افزایش قطر ابزار، عمق دره‌های گلبرگ بوش ایجادشده نیز افزایش می‌یابند که سبب افزایش ماده تغییر شکل‌یافته و در نتیجه افزایش بیشتر طول بوش می‌گردد.

با افزایش قطر ابزار مقدار ماده‌ای که دچار تغییر شکل می‌شود بیشتر شده که این عامل در کنار افزایش سطح اصطکاکی روی طول و ضخامت بوش

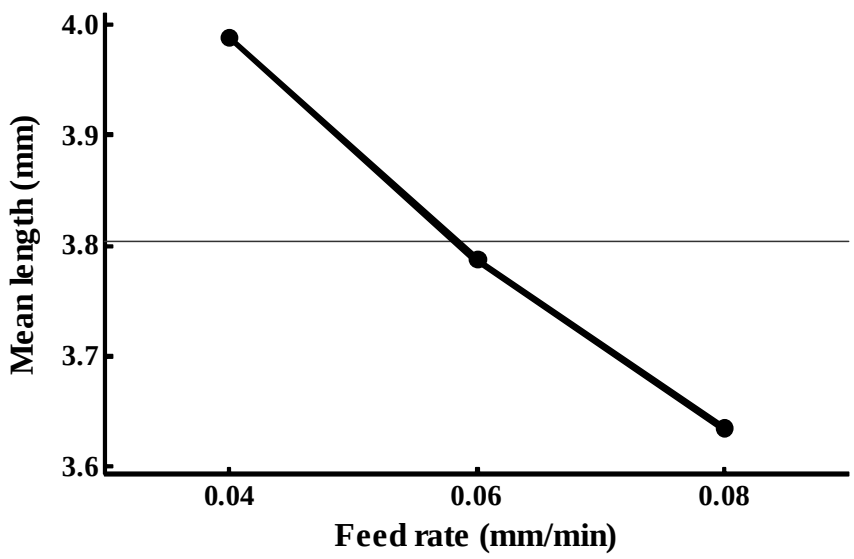


Fig. 9 Effect of feed rate on bush length

شکل 9 تأثیر سرعت پیشروی بر طول بوش

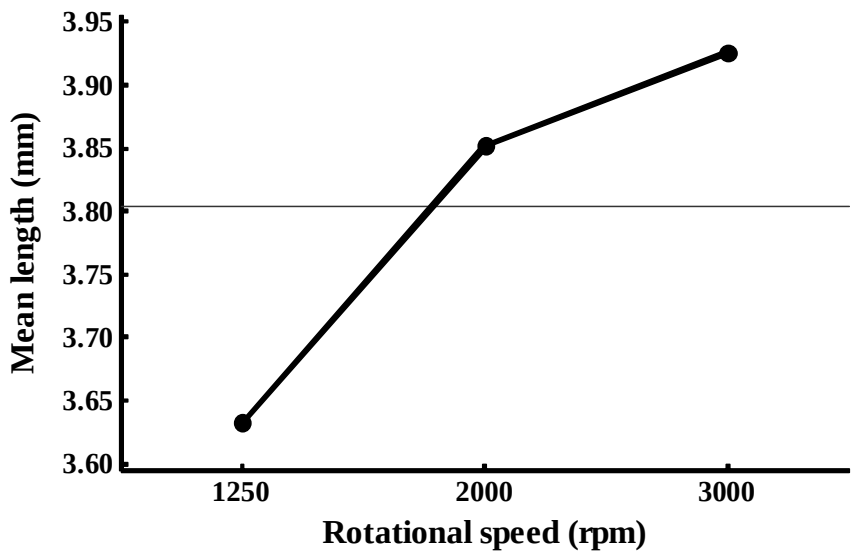


Fig. 10 Effect of rotational speed rate on bush length

شکل 10 تأثیر سرعت دورانی بر طول بوش

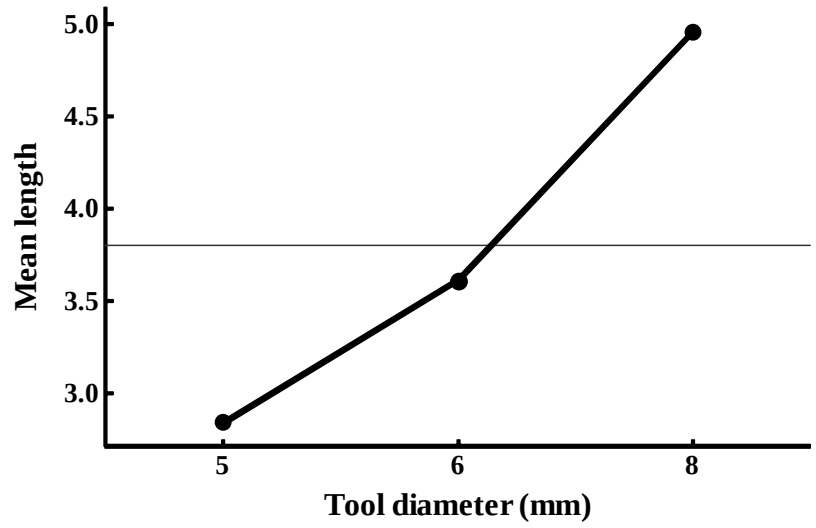


Fig. 11 Effect of tool diameter on bush length

شکل 11 تأثیر قطر ابزار بر طول بوش

تأثیرگذار خواهد بود. البته تأثیر افزایش ماده به نسبت افزایش سطح اصطکاک کمتر است، زیرا با افزایش قطر مته، محیط بوش نیز افزایش پیدا می‌کند که این خود جبران‌کننده این افزایش ماده است.

5-4- اثرات متقابل

در صورتی‌که بین پارامترها اثر متقابل وجود داشته باشد، اثرات اصلی اهمیت خود را از دست می‌دهند و نتیجه‌گیری بدون در نظر داشتن اثرات متقابل فاقد اعتبار علمی خواهد بود. از شکل 12 می‌توان نتیجه گرفت که اثرات متقابل تأثیر چندانی ندارند. اثرات اصلی معنادار باقی می‌مانند. برای اطمینان بیشتر، از بررسی مقادیر P جدول 7 نیز همین نتیجه حاصل می‌شود.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر سه پارامتر مهم فرایند سوراخ‌کاری اصطکاکی شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر ابزار بر طول بوش فولاد زنگ‌نزن AISI 304 با شبیه‌سازی به روش اجزای محدود و طراحی آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت و با تحلیل واریانس نتایج زیر حاصل شد:

- قطر ابزار (95%) مهم‌ترین عامل مؤثر فرایند است. با افزایش قطر به دلیل این‌که سطح اصطکاک بیشتر می‌شود؛ بنابراین حرارت تولیدشده نیز افزایش می‌یابد که موجب شکل‌گیری راحت‌تر بوش و افزایش طول آن می‌شود. سرعت دورانی (2%) و سرعت پیشروی (3%) کمترین تأثیر را بر تغییر طول بوش ایجاد شده در سوراخ‌کاری اصطکاکی دارند.

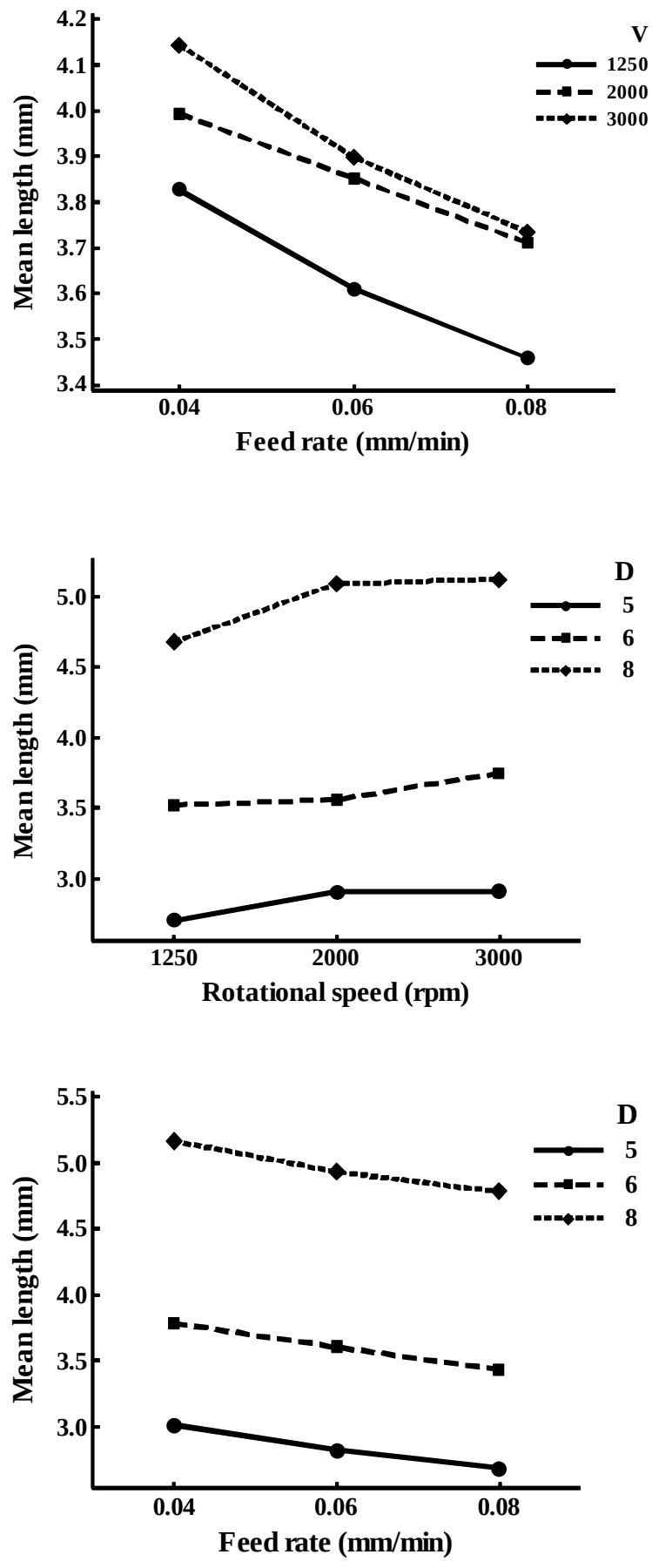


Fig. 12 Interaction plots of parameters on bush length

شکل 12 ماتریس اثرات متقابل عامل‌ها بر طول بوش

- مقدار طول بوش با افزایش سرعت پیشروی ابزار در محدوده یادشده، در نمونه‌ها روندی کاهشی داشته است.
- طول بوش ایجاد شده در قطعه کار رابطه عکس با نرخ پیشروی دارد و با کاهش نرخ پیشروی طول افزایش می‌یابد. با این وجود ضخامت بوش رابطه مستقیم با نرخ پیشروی دارد و با افزایش پیشروی ضخامت بوش افزایش می‌یابد. با افزایش پیشروی جرم ورق تشکیل‌دهنده، فرصت کمتری برای شکل‌گیری دارد؛ بنابراین به‌صورت انباشته درمی‌آید و به جای افزایش طول، افزایش ضخامت می‌یابد.

6- تشکر و قدردانی

از زحمات و همکاری‌های مدیر عامل و کارکنان شرکت شرق صنعت شهرستان نیشابور و همچنین آقای رحمانی بابت همکاری صمیمانه در انجام آزمایش‌های تجربی تشکر و قدردانی می‌شود.

7- مراجع

[1] S. F. Miller, J. Tao, A. J. Shih, Friction drilling of cast metals, *Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1526–1535, 2006.

[2] P. Krasauskas, S. Kilikevičius, R. Česnavičius, D. Pačenga, Experimental analysis and numerical simulation of the stainless AISI 304 steel friction drilling process, *Mechanika*, Vol. 20, No. 6, pp. 590–595, 2014.

[3] H. M. Chow, S. M. Lee, L. D. Yang, Machining characteristic study of friction drilling on AISI 304 stainless steel, *materials processing technology*, Vol. 207, No. 1-3, pp. 180–186, 2008.

[4] S. M. Lee, H. M. Chow, F. Y. Huang, B. H. Yan, Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN and TiAlN coated tungsten carbide tools, *Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, No. 1, pp. 81–88, 2009.

[5] S. F. Miller, P. J. Blau, A. J. Shih, Microstructural Alterations Associated With Friction Drilling of Steel, Aluminum, and Titanium, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 14, No. 5, pp. 647-653, 2005.

[6] S. F. Miller, P. J. Blau, A. J. Shih, Tool wear in friction drilling, *Machine Tools & Manufacture*, Vol 47, No. 10, pp. 1636–1645, 2007.

[7] P. V. G. Krishna, K. Kishore, V. V. Satyanarayana, Some investigations in friction drilling AA6351 using high speed steel tools, *Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 3, pp. 11-15, 2010.

[8] W. L. Ku, C. L. Hung, S. M. Lee, H. M. Chow, Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 9-12, pp. 935–944, 2011.

[9] P. Krasauskas, Experimental and statistical investigation of thermo-mechanical friction drilling process, *Mechanika*, Vol. 17, No. 6, pp. 681-686, 2011.

[10] P. D. Pantawane, B. B. Ahuja, Experimental investigations and multi-objective optimization of friction drilling process on AISI 1015, *applied engineering research*, Vol. 2, No. 2, pp. 448-461, 2011.

[11] A. Gopichand, M. Veera Brahmam, D. Bhanuprakash, Numerical Simulation and Analysis of Friction Drilling Process for Alumina Alloy using Ansys, *Engineering Research & Technology*, Vol. 3, No. 12, pp. 2278-0181, 2014.

[12] A. Sara, E. Hazem, T. Tawfik, Optimization of Thermal Friction Drilling Process Based on Taguchi Method and Fuzzy Logic Technique, *Science and Engineering Applications*, Vol. 4, No. 2, pp. 2319-7560, 2015.

[13] R. Serway, R. J. Beichner, J. W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*, 5th ed., Saunders College, pp. 578-590, 2000.

[14] M. Awang, V. H. Mucino, Z. Feng, S. A. David, Thermo mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Use of an Explicit Adaptive Meshing Scheme, *Technical Paper for the Society of Automotive Engineers 2005 World Congress*, Detroit, USA, 2005.

[15] H. Schmidt, J. Hattel, Modelling heat flow around tool probe in friction stir welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 10, No. 2, pp. 176–186, 2005.

[16] D. Servis M. Samuelides, Implementation of the T-failure criterion in finite element methodologies, *Computers and Structures* Vol. 84, No. 3-4, pp. 196-214, 2006.

[17] M. Awang, V. H. Mucino, Z. Feng, and S. A. David, Thermo-mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Use of an Explicit Adaptive Meshing Scheme, *Technical Paper for the Society of Automotive Engineers 2005 World Congress*, Detroit, USA, 2005.

[18] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini, A continuum based fem modfriction stir welding– model development, *Materials Science and Engineering*, Vol. 419, No. 1-2, pp. 389-396, 2006.

[19] B. Padma Raju, M. Kumara Swamy, Finite Element Simulation of a Friction Drilling process using Deform-3D, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, No. 6, pp. 716-721, 2012.

[20] D. Ghahremani Moghadam, K. Farhang Doost, A. Rastegar, M. Ramezani Moghaddam, Tool's Speed effect on hardness and residual stress in friction stir welded Al 2024-T351: Experimental method and Numerical simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 61-71, 2015 (in Persian فارسی).