

ماهنامه علمى پژوهشى

ی مکانیک مدر س



5.15

بررسی تجربی و شبیه سازی اثر پارامترهای سوراخ کاری اصطکاکی بر طول بوش در ورق فولاد زنگنزن AISI 304

سجاد خيشه¹، حسين امير آبادي^{2*}، سيدمحمدحسين سيدكاشي³

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

* بيرجند، صندوق يستى 97175/376، hamirabadi@birjand.ac.ir

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

Sajad Khisheh¹, 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

روشهای متداولی وجود دارد مانند اضافه کردن اتصالات به کمک جوشکاری

ARTICLE INFORMATION

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

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.

Finite element simulation

1- مقدمه

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

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 شکل دهی اصطکاکی سوراخ، سوراخ کاری حرارتی، سوراخ کاری فرم و سوراخ کاری جنبشی اصطکاکی نیز شناخته می شود. به کمک این روش، هم زمان با سوراخ کاری ورق جدار نازک، یک بوش یکنواخت نیز روی آن تشکیل می شود. هدف از ایجاد این بوش افزایش ضخامت برای ایجاد امکان قلاویز کاری و مهار نیرو است [1]. سوراخ کاری اصطکاکی فرآیندی تمیز و بدون براده است.

در روش معمول برای ایجاد یک سوراخ در قطعات کار، جرمی از ورق در ناحیه سوراخ کاری به صورت براده برداشته میشود. به طور کل در اتصال ورقها بهتر است که جرم ورق در ناحیه سوراخ کاری باقی بماند تا با فرمدادن آن به صورت بوش در پشت ورق، اتصال مستحکمی در آن ناحیه ایجاد شود. مراحل اصلی فرآیند سوراخ کاری 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 می گردد. نوک ابزار هر دو حرکت شعاعی و محوری مته را پشتیبانی می کند؛ 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 می شود.

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 سوراخ کاری اصطکاکی فولاد زنگنزن، بررسی تجربی و آنالیز نیرو و گشتاور سوراخ کاری 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 سوراخ کاری، 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 می کند که ناشی از تغییرات حرارتی و مقدار تغییر شکل است [5]. میلر [6,1] در زمینه سایش ابزار در فرایند سوراخ کاری 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 می کند و تغییرات در رنگ سوراخ نشان دهنده حرارت تولیدی در سرعتهای دورانی مختلف است. نتايج آماري بهدست آمده توسط ليانگكو [8] نشان ميدهد كه زاويه مخروط و سرعت دوران محور پارامترهای مؤثری هستند که زبری سطح را تحت تأثير قرار مىدهند. وقتى زاويه مخروط كمينه مقدار را اختيار كند.



(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] $m \Delta t$ and a difference of the set of the se

طول منطقه تماس ابزار افزایش مییابد؛ بنابراین دمای بالاتری در سطح منطقه سوراخ کاری ایجاد میشود در نتیجه زبری سطح کمتری در دیواره سوراخ ایجاد میشود. کراوس کاس [9] نتیجه گیری 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 سوراخ کاری اصطکاکی را برای آلومینا شبیهسازی و تجزیه و تحلیل کردند. ایشان به بررسی کرنشهای الاستیک، تنش و تغییرشکل مواد در سوراخ کاری اصطکاکی پرداختند. سارا و همکاران [12] با استفاده از روش تاگوچی و منطق فازی پارامترهای فرایند سوراخ کاری 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- شبیه سازی عددی فرایند سوراخ کاری اصطکاکی 2-1- فرمول بندی روش المان محدود حرارتی - مکانیکی حرارت ایجادشده توسط اصطکاک و تغییر شکل پلاستیکی، درجه حرارت

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.26.4]

296

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

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

در این جا ρ دانسیته، z گرمای ویژه، k هدایت حرارتی، T درجه حرارت، t زمان، G نرخ تولید گرما و x، و z مختصات فضایی است. ρ ، z، 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 سوراخ کاری 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].

$$\vec{h} = \vec{q}_f + \vec{q}_p \tag{2}$$

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.

$$\tau_{\text{yield}} = \frac{\sigma_{\text{yield}}}{\sqrt{3}} \tag{3}$$

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

$$\dot{q_f} = 2\pi R N \mu F_n \tag{4}$$

که R شعاع و N سرعت چرخشی ابزار است. نرخ تولید گرما را میتوان به صورت رابطه (5) نوشت. $\dot{a}_{m} = n\sigma\varepsilon^{pl}$

(3)
$$q = \eta \sigma \varepsilon^{pr}$$
 (3) در اینجا η بخش حرارت غیر الاستیکی، σ تنش مؤثر و ε^{pl} نرخ کرنش پلاستیکی هستند [16]. در سوراخکاری اصطکاکی اغلب انرژی بخش الاستیک در تغییرشکلهای پلاستیکی زیاد، کم است [18,17].

2-2- مدلسازى

برای شبیهسازی مکانیکی- حرارتی فرایند سوراخ کاری اصطکاکی از نرمافزار اباکوس *ا* 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 تطبیقی¹، حذف المان² و جرم انباشته³ استفاده شد. مش تطبیقی و حذف المان در تغییر شکلهای زیاد، کیفیت مش قطعه را با معیار کرنش پلاستیک حفظ میکنند [19,11,2]. مکانیکی معرفی شده و از المان TSDB که یک المان مربعی هشت گرهای است، برای انجام شبیهسازی ابتدا فرآیند به صورت یک کوپل حرارتی-مکانیکی معرفی شده و از المان TSDB که یک المان مربعی هشت گرهای 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 كردن ابعاد المانها و ناحيهبندي مناسب مشبندي ميشوند.

مدل اجزای محدود فرایند در شکل 2 نشان داده شده است. قطعه کار دارای قطر 20 میلیمتر و ضخامت 2 میلیمتر است. نمونه مدل سازی 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 جهات مقید و سطح بالای قطعه کار تحت جریان همرفت با ضریب همرفت در شکل 2 مش های المان محدود ابتدایی شامل 23992 المان و 25905 گره است. با توجه به تولید بوش و حرارت شکل دهی 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 مش بندی ALE که در تحقیق کنونی به کار گرفته شده است ترکیبی از روش های اولر و لاگرانژ است که جهت کسب مزایای هر دو روش به کار رفته است. این روش یک ابزار قوی برای بهبود مش در مسائل با تغییر شکل بزرگ است. در این روش مش به صورت آزادانه در تمام مواد حرکت می کند یعنی المان ها نه به ماده متصل هستند و نه در فضا ثابت می مانند. نتایج شبیه سازی به اندازه مش بسیار حساس است. گرادیان کرنش پلاستیک در فصل مشترک بسیار بالاست؛ بنابراین اگر مش بندی خشن باشد، تعداد زیادی از المان ها به شدت اعوجاج پیدا می کنند و حذف می شوند. در نتیجه بوش ایجاد شده شکل نامناسبی پیدا می کند. در مقابل اگر مش بندی خیلی ریز باشد، زمان شبیه سازی به شدت افزایش می باد، ولی نتایج تغییری ابعاد المان ها براس آنالیز حساسیت نسبت به اندازه مش 10×5 می کرومتر و. ابعاد المان ها براساس آنالیز حساسیت نسبت به اندازه مش 10×5 می کرومتر و.

برای تعریف خواص پلاستیک مواد، مدل جانسون - کوک⁴، که در رابطه (6) ارائه داده شده، به کار رفته است. مقدار ضرایب رابطه (6) و خواص فولاد (تگنزن AISI 304، به ترتیب در جدولهای 1 و 2 آمده است [20].

$$\sigma_{y} = \left[A + B(\varepsilon_{p})^{n}\right] \left[\mathbf{1} + C(\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{p}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right))\right] \\ \left[\mathbf{1} - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}\right)^{m}\right]$$
(6)

که در آن، \mathcal{E}_p کرنش پلاستیک، $\dot{\mathcal{E}}_p$ نرخ کرنش پلاستیک، T دمای ماده، \mathcal{E}_p دمای نقطه ذوب ماده، σ_y تنش در دمای T هستند و سایر پارامترها در $T_{
m melt}$ دمای 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 می شود که معیار شکست (D) طبق رابطه (7) از 1 تجاوز کند.

$$D = \Sigma \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \right)$$

کرنش شکت $ar{\mathcal{E}}^{
m pr}_f$ با رابطه (8) تعیین می شود.

(7)

, e e e , e , e , e , e , e , e , e , e
$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})] \left[1 + d_4 \ln \frac{\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_0}\right]$
$[1+d_5\frac{T-T_0}{T_{\text{melt}-T_0}}] $ (8)
d_5 -d_1 ثابتهای ماده هستند که از دادههای تجربی بهدست میآیند و
مبارت p تنش فشاری و q تنش فونمایزز است. مقادیر معیار شکست در
جدول 3 آورده شده است.
اصطکاک بین ابزار و ورق در سوراخ کاری پدیدهای بسیار پیچیده است.
در این مطالعه ضریب ثابت اصطکاک توسط قانون کلمب برابر 0.5 قرار داده

4- Johnson-Cook

1- Adaptive meshing

2- Element deletion

3- Mass scaling

شد. ضریب اصطکاک 0.5 نزدیک ترین نتایج به شبیه سازی را در بازه ضرایب 0.7-0.3 به دست داد.

3- روش آزمایش 1-3- فرایند سوراخ کاری اصطکاکی

ورقهای مورد استفاده برای سوراخ کاری 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 سوراخ کاری اصطکاکی از ابزارهای شکل 4 از جنس آلیاژ تنگستن کارباید استفاده شده است. سواخ کاری 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 mm/min 0.06 و سرعت دورانی 2000 rpm و 2000 و مرعت دورانی 2000 rpm

جدول 1 ثابتهای مدل ماده جانسون کوک برای فولاد زنگنزن AISI 304 [2] Table 1 Johnson-Cook constants for AISI304 stainless steel [2]

		[_]
مقدار	واحد	پارامتر
1673	Κ	$T_{ m melt}$ دمای مرجع،
1000	Κ	$T_{ m room}$ دمای مرجع،
280	MPa	تنش تسليم، A
902 5	MD-	

جدول 3 پارامترهای شکست جانسون کوک برای فولاد زنگنزن AISI 304 [2] [2] Table 3 Johnson-Cook fracture constants for AISI304 stainless steel

فولاد زنگنزن AISI 304	پارامترهای معیار شکست
0.69	<i>d</i> 1
0	d2
0	<i>d</i> 3
0.0546	d4
0	d5

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

سوراخ کاری با دستگاه دریل رادیال مدل I6I×Z3050 انجام شده است. ابتدا ورق فولادی در داخل گیرهها مقید می شود، سپس از یک قطعه چوبی به عنوان صفحه پشتیبان در زیر ورق استفاده می شود.

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 Mechanic	cal properties of	of AISI304 stai	nless steel	
مدول الاستيسيته	تنش تسليم	تنش نھایی	ضريب	دانسيته
(GPa)	(MPa)	(MPa)	پواسون	(N/m ³)
207.8	260	690	0.30	8000



Fig. 4 Drilling tools with diameter of 8, 6 and 5 mm شکل **4** ابزارهای سواخ کاری به ترتیب از راست به چپ دارای قطر 5، 6 و 8 میلیمتر

802.5 MPa B ، استحكام، B 0.622 1.0 نمای دما، m 0.0799 C 1.0 1/s $\dot{\epsilon}_0$ ، $\dot{\epsilon}_0$

جدول 2 خواص حرارتي فولاد زنگنزن AISI 304 [2]

Table 2 Thermal properties of AISI304 stainless steel [2]

گرمای ویژه	ضريب هدايت حرارتي	ضريب انبساط
(J/kg/K)	(W/ m.K)	10^{-6} K^{-1}
452	16.2	17.8

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

298







Fig. 5 a) experimental tool, b) a drilled sample, c) formed bush, d) comparison of numerical and experimental bushes
(ج) شکل 5 الف) ورق های در حال سوراخ کاری، ب) یک نمونه ورق سوراخ کاری شده، (ج) بوش ایجاد شده روی ورق، (د) مقایسه بوش شبیه سازی با تجربی

5 آورده شده است. تعداد نقاط طراحی برابر با n=3³=27 آزمایش خواهد بود که تمام آنها انجام گرفته است.

3-3- تعيين طول بوش

طول بوش نمونهها در آزمایشگاه اندازه گیری 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 اندازه گیری مختصات¹ با دقت 0.001

4- تحليل نتايج

تمامی آزمایشها برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف سوراخ کاری برای تشکیل بوشی با خصوصیات مکانیکی مطلوب براساس طراحی آزمایش انجام شد. همان طور که پیشتر نیز بیان شد، در سوراخ کاری اصطکاکی کیفیت بوشهای تولید شده، به طور کل تابع پارامترهای فرایندی نظیر سرعت دورانی، سرعت پیشروی و همچنین هندسه ابزار است. بهینه سازی این پارامترها برای به دست آوردن بوش بی عیب 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 تب² تحلیل و به کمک نمودارهای آماری به دقت مورد بررسی قرار گرفت.

1-4- تحليل واريانس نتايج

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 به کارگیری این تحلیل، فرضیههای این روش در مورد دادههای آزمایشی این تحقیق بررسی شود. نمودار احتمال نرمال مقادیر

جدول 5 سطوح پارامترهای ورودی

	vels	t parameters le	Table 5 Inpu
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

		0	r r		
درصد	طول بوش	طول بوش	سرعت	سرعت	قوا انا
اختلاف	مدلسازى	تجربى	پیشروی	دوراني	فطر ابرار mm
%	mm	mm	mm/min	rpm	11111
25	2.151	2.904	0.04	1250	5
26	1.9	2.677	0.06	1250	5
32	1.740	2.521	0.08	1250	5
22	2.332	3.024	0.04	2000	5
34	1.904	2.908	0.06	2000	5
34	1.814	2.785	0.08	2000	5
19	2.532	3.012	0.04	3000	5
23	2.297	2.876	0.06	3000	5
27	2.101	2.742	0.08	3000	5
21	2.913	3.691	0.04	1250	6
22	2.756	3.513	0.06	1250	6
28	2.442	3.350	0.08	1250	6
18	3.001	3.715	0.04	2000	6
22	2.758	3.560	0.06	2000	6
24	2.561	3.402	0.08	2000	6
15	3.343	3.947	0.04	3000	6
19	3.085	3.741	0.06	3000	6
20	2.778	3.550	0.08	3000	6
14	4.189	4.888	0.04	1250	8
14	3.981	4.639	0.06	1250	8
19	3.641	4.504	0.08	1250	8
8	4.780	5.245	0.04	2000	8
10	4.448	5.090	0.06	2000	8
19	4.004	4.942	0.08	2000	8
14	4.587	5.385	0.04	3000	8
22	3.904	5.080	0.06	3000	8
10	4.376	4.912	0.08	3000	8

میلیمتر (شکل 6) اندازه گیری 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.

2- Minitab

299

1- CMM

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 تنظیم شده و میانگین مربعات تنظیم یافته است. سطح اطمینان در این تحقیق برابر %95 انتخاب شده است. مقدار P کمتر از 500 نشاندهنده

از نتایج به دست آمده مشخص شد که بیشترین تأثیر بر طول بوش ایجاد شده در سوراخ کاری 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- تأثير سرعت پيشروى

در فرایند سوراخ کاری اصطکاکی با افزایش سرعت پیشروی چون ماده مومسان فرصت کمتری برای شکل گیری دارد؛ بنابراین طول بوش کمتر



Fig. 6 Measurement of bush length by CMM CMM اندازه گیری طول بوش با دستگاه





Fig. 8 Residual versus fitted value plot

شکل 8 نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازشیافته

جدول 7 جدول تحليل واريانس برای طول بوش Table 7 Analysis of variance table for bush length

 	J === •			8		
0/2	P	F	ميانگين	مجموع	درجه	م:ارم
70	1	1	مربعات	مربعات	ازادی	معاجع
95.16	0.000	24407.9	10.441	20.882	2	D
1.92	0.000	492.91	0.210	0.421	2	V
2.6	0.000	665.79	0.284	0.569	2	F
0.28	0.000	73.86	0.031	0.126	4	$D \! imes V$
0.00	0.131	2.45	0.001	0.004	4	$D \! imes F$
0.03	0.006	8.30	0.003	0.014	4	$V\!\!\times\!\!F$

می شود. با توجه به تحلیل نتایج به دست آمده مشخص شد که با افزایش 50 درصدی سرعت پیشروی، طول بوش %5 کاهش می یابد. شکل 9 تأثیر سرعت پیشروی بر طول بوش را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود 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 می یابد. این موضوع سبب افزایش مقدار انرژی گرمایی تولید شده در اثر اصطکاک نیز می شود. مدت زمان بیشتر فرآیند سوراخ کاری فرصتی را فراهم می آورد 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 جابه جایی قسمت خمیری افزایش پیدا کرده و طول بوش ایجاد شده افرایش می یابد. به طور کلی می توان گفت که با افزایش پیشروی جرم ورق تشکیل دهنده بوش فرصت کمتری برای شکل گیری دارد؛ بنابراین

4-3- تأثير سرعت دوراني

در فرایند سوراخ کاری اصطکاکی چرخش ابزار سبب ایجاد اغتشاش و ترکیب مواد با یکدیگر میشود. هر چه سرعت دورانی افزایش یابد، میزان حرارت

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.26.4]

ورودی به منطقه اغتشاش نیز افزایش خواهد یافت؛ بنابراین سرعت دورانی بالا منجر به افزایش دما در ناحیه سوراخ کاری به دلیل افزایش حرارت ناشی از اصطکاک میشود و بوش راحت تر شکل می گیرد. 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 می تواند به دو دلیل زیر بیان شود:

Fig. 7 Normal probability plot

شکل 7 نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده

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

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

تأثیر گذار خواهد بود. البته تأثیر افزایش ماده به نسبت افزایش سطح اصطکاک کمتر است، زیرا با افزایش قطر مته، محیط بوش نیز افزایش پیدا می کند که این خود جبران کننده این افزایش ماده است.

4-5- اثرات متقابل

در صورتی که بین پارامترها اثر متقابل وجود داشته باشد، اثرات اصلی اهمیت خود را از دست میدهند و نتیجه گیری 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- نتيجه گيري

در این تحقیق، تأثیر سه پارامتر مهم فرایند سوراخ کاری اصطکاکی شامل

- 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 می کند. با افزایش سیاب که این سرعت دورانی حرارت تولید شده از اصطکاک افزایش مییاب که این سرعت دورانی از 1250 به سبب اغتشاش بیشتر مواد می شود. زمانی که سرعت دورانی از 1250 به میب اغتشاش بیشتر مواد می شود. زمانی که سرعت دورانی از 1250 به افزایش در سرعت بالای 2000 دور بر دقیقه کاهش مییاب و این نرخ دورانی بالاتر سبب ایجاد حرارت بیشتر و در نتیجه راه یافتن مواد مومسان به قسمت بالای ورق می شود که این خود سبب ایجاد جای مومسان به قسمت بالای ورق می شود که این خود سبب ایجاد جای خالی در منطقه اغتشاش می شود. همچنین در نتیجه گرمای زیاد تولید شده سرعت سرد شدن کاهش مییاب و جای خالی ها در 3000 دور بر خالی در منطقه اغتشاش می شود. همچنین در نتیجه گرمای زیاد تولید شده سرعت سرد شدن کاهش مییاب و جای خالی ها در 3000 دور بر که شده سرعت بهبود لبه بوش و پر شدن بهبر درههای گلبرگ بوش می شود که می بهبر در می بهبود لبه بوش و یر شدن بهبر درههای گلبرگ بوش می شود و در نتیجه نرخ افزایش طول بوش کاهش مییابد.

4-4- تأثير قطر ابزار

هندسه ابزار نقش بسیار مهمی در جریان مواد و تولید حرارت در سوراخ کاری اصطکاکی بازی می کند. اصطکاک بین ابزار و سطح نمونه بیشترین بخش از حرارت مورد نیاز برای سوراخکاری را تأمین می کند. قطر ابزار با میزان حرارت تولیدی در حین فرآیند رابطه مستقیم دارد و از مهم ترین متغیرهای فرایند سوراخکاری اصطکاکی است که میزان حرارت ورودی میانگین به منطقه اغتشاش را تعیین می کند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که با افزایش تقریبا 20 درصدی قطر ابزار، طول بوش %25 افزایش می یابد (شکل افزایش تقریبا 20 درصدی قطر ابزار، طول بوش %25 افزایش می یابد ا11). این به دلیل این است که با افزایش قطر ابزار سطح تماس با ورق افزایش می یابد؛ بنابراین در نتیجه تولید حرارت بیشتر طول بوش نیز افزایش می یابد. تغییر شیب افزایش طول بوش با افزایش قطر ابزار، عمق درههای گلبر گ بوش میلی متر به این دلیل است که با افزایش قطر ابزار، عمق درههای گلبر گ بوش نیجاد شده نیز افزایش می یابند که سبب افزایش ماده تغییر شکل یافته و در ایجاد شده نیز افزایش می باند که سبب افزایش ماده تغییر شکل یافته و در نتیجه افزایش بیشتر طول بوش می گردد.

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



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%) مهم ترین عامل مؤثر فرایند است. با افزایش قطر به
دلیل این که سطح اصطکاک بیشتر می شود؛ بنابراین حرارت تولیدشده
نیز افزایش می یابد که موجب شکل گیری راحت تر بوش و افزایش طول
آن می شود. سرعت دورانی (2%) و سرعت پیشروی (3%) کمترین
تأثیر را بر تغییر طول بوش ایجاد شده در سوراخ کاری اصطکاکی دارند.

Fig. 9 Effect of feed rate on bush length شکل 9 تأثیر سرعت پیشروی بر طول بوش

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

301

جاي افزايش طول، افزايش ضخامت مييابد.

6- تشكر و قدرداني 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 thermomechanical friction drilling process, Mechanika, Vol. 17, No. 6, pp. 681-686, 2011.
- [10] P. D. Pantawane, B. B. Ahuja, Experimental investigations and multiobjective 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.





شكل 12 ماتريس اثرات متقابل عاملها بر طول بوش

- مقدار طول بوش با افزایش سرعت پیشروی ابزار در محدوده یادشده، در نمونهها روندی کاهشی داشته است.

[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 (فارسی Persian).

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 می یابد. با افزایش پیشروی جرم ورق تشکیل دهنده، فرصت کمتری برای شکل گیری دارد؛ بنابراین بهصورت انباشته درمیآید و به