



Analysis of Friction Behavior of 17-7 PH Stainless Steel Using Nano-lubricant in Hot Forging Process

Yaser Moghani¹, Mohammad Morad Sheikhi^{2*}, Yaghoub Dadgar Asl³, Shahrouz Yousefzadeh⁴

¹PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Aligudarz Branch, Islamic Azad University, Aligudarz, Iran.

²Assistant Professor, Department of Manufacturing, Shahid Rajee Teacher Training University (SRTTU), Tehran, Iran.

³Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

⁴Msc, Department of Mechanical Engineering, Aligudarz Branch, Islamic Azad University, Aligudarz, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:
Original Research

Received: 10.10.2021
Revised: 10.20.2021
Accepted: 11.10.2021

Keyword:
Hot Forging
Nano-lubricant
17-7PH Stainless Steel
Ring Compression Test (RCT)
Finite Element Analysis (FEA)

***Corresponding Author:**
Mohammad Morad Sheikhi
Email: m.sheikhi@sru.ac.ir

The material forming through the forging process is one of the manufacturing methods in which the metal is compressed or subjected to high forces to create high-strength parts. Before the process, a lubricant is added to the mould to increase the metal flow, reduce friction and wear, and help separate the final part from the mould. The lubricant in hot forging process and lubrication are key factors for increasing production quality. One of the best ways to study the effect of lubricants in this process is ring compression testing (RCT). In this study, the effect of nanoparticles (Aluminum oxide (AL₂O₃) and Nano-glass) as an additive to base oil (SAE10) at 1050 °C on the friction behaviour of 7-17 PH stainless steel using RCT and finite element analysis (FEA) was studied. Finally, the importance of using nano-lubricants in hot forging process was investigated. The results showed that nanoparticles as lubricant additives performed better than conventional lubricants (such as graphite) for the frictional behaviour of 7-17 PH stainless steel in hot forging process. For 7-17PH stainless steel at 1050 °C, the friction factor was reduced by approximately 36% with the addition of AL2O3 nanoparticles and by approximately 40% with the addition of glass nanoparticles. Therefore, adding nano-glass presented better results compared to AL2O3 nanoparticles.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Friction is an important variable and has significant effects on both workpiece and forming process. Lubricants have been widely used in bulk metal forming to reduce the friction and improve the process. RCT has been used in different research to study the friction behavior and lubrication effects in the forging process. A set of calibration curves were obtained experimentally by using reduction in inner diameter and height of ring. The correct way for calculating friction coefficient in RCT is establishing the relationship between inner diameter decrease percentage and height decrease percentage. This relationship was made by FEA. The results were presented by calibration curves for the rings with the standard ratio in outer diameter, inner diameter, thickness respectively such as (6:3:2) and (6:3:4). In this research, RCT and FE results were compared and validity of common calibration curve investigated. Then, friction calibration curves of 17-7PH stainless steel under a certain temperature (1000°C) was diagramed using DEFORM-3D Engineering Software.

Methodology

The ring compression test conditions (lubricant types, temperature and height reduction percentage) are presented in Table 1.

Table 1. Different RCTs conditions.

Test No.	1	2	3	4	5	6
Lubricants type	DRY	DRY	Graphite	Graphite	Glass	Glass
Temperature	1000°C	1000°C	1000°C	1000°C	1000°C	1000°C
Thickness percentage	30%	50%	30%	50%	30%	50%

For different thickness percentages (30% and 50%), experimental results are shown in generalized friction calibration curve in Figure 1.

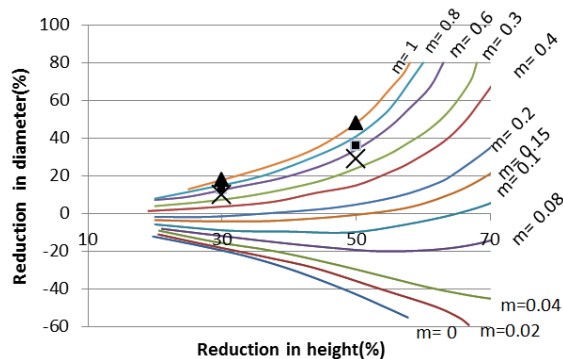


Figure 1. RCT results for different lubrication conditions and thickness percentages.

Results and discussion

In the present research, FEA was performed with the DEFORM-3D Engineering Software. Load – time diagram for different lubrication conditions were utilized in DEFORM-3D Engineering Software for FE simulation as shown in Figure 2. As illustrated, by using screw press, the load-time slope increased rapidly at the initial step. In addition, the diagram slope for graphite lubricant was less than glass powder lubricant because graphite is more effective in lubricating than glass powder. Glass powder is also more effective than dry condition. For graphite and glass powder lubricants, initial step of load-time diagram is somewhat similar because contact was started and lubricant had less effect. However, after creating pressure by top die on the part, lubricants were more effective. For instance, the required load for 50% thickness percentage using powder glass was approximately 140,000N and using graphite was approximately 120,000N. Experimental and simulated friction factors for thickness percentages of 30% and 50% under different lubrication conditions (dry, graphite and glass) obtained are presented in Table 2. The maximum error between experimental and simulated averaged friction factors was related to the graphite lubricant.

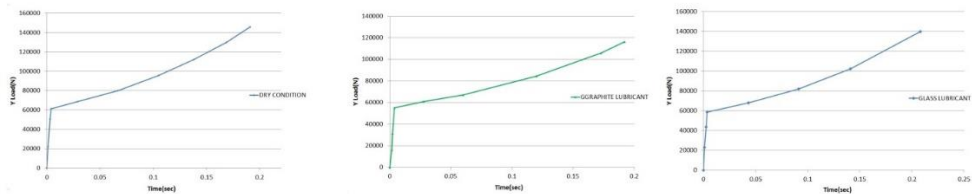


Figure 2. Load-time curve for FEA.

Table 2. Obtained friction factors from simulation and experimental results.

Do:Di:H (18:9:6) Height reduction%	Dry Condition		Graphite Lubricant		Glass Lubricant	
	Simulation	experimental	Simulation	experimental	Simulation	experimental
50%	0.94	0.98	0.46	0.50	0.63	0.68
30%	0.96	0.94	0.50	0.54	0.71	0.64
Average	0.95	0.96	0.48	0.52	0.67	0.66

To study the effect of H/T on calibration curve, two values of H/T coefficients (5 and 10 $kW (m^2k)-1$) under dry conditions were considered and the related calibration curves illustrated in Figure 3. As shown, for dry conditions, thickness reduction percentage of 30% and the H/T coefficient of 5 m^2k-1 , inner diameter reduction was approximately 19%; under similar conditions for the H/T coefficient of 10 m^2k-1 , inner diameter reduction was approximately 16%.

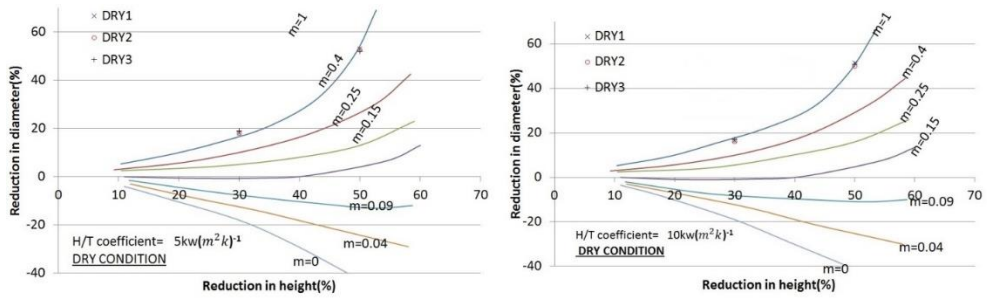


Figure 3. The effect of H/T coefficient value on calibration curve under dry conditions.

Conclusion

The experimental friction factor results under different conditions (different lubricants and thickness percentages) for 17-7 PH stainless steel were obtained and diagramed in standard calibration curves. Friction calibration curve must be diagramed for special material and under a certain temperature of ring. However, under cold forging, researches have shown that friction calibration could be used as a general method. Under hot forging, friction calibration curve for any special material and under a specific temperature and different lubricants must be determined. Difference of friction factor values between experimental and simulated results obtained are presented in Table 2. Thus, the generalized calibration curve could not be used for 17-7 PH stainless steel in hot forging and under different conditions of experiments. The related calibration curve for 17-7 PH stainless steel at a temperature of 1000°C was diagramed in Figure 4. The FE simulated data under different conditions (thickness percentage of 30% and 50% - using glass and graphite lubricants and dry condition) was also determined. Finally, the findings of the present research are listed below:

- 1- By comparing data in Table 3, for both thickness reduction percentages (30% and 50%), graphite powder obtained a better result (low friction factor) than glass powder lubricant.
- 2- By comparing calibration curves for the two different H/T coefficients, the result showed that friction factor was less than $5 \text{ kW} (m^2 k)^{-1}$ by using the value of $10 \text{ kW} (m^2 k)^{-1}$. Thus, using H/T coefficient factor of $10 \text{ kW} (m^2 k)^{-1}$ in hot forging of 17-7 PH stainless steel is more effective and applicable.

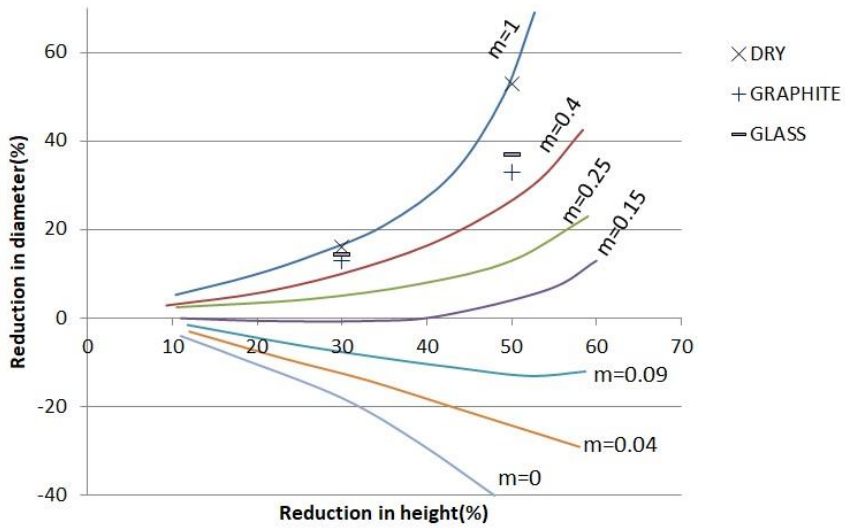


Figure 4. Calibration curve for 17-7 PH stainless steel in 1000°C by FE simulation.

NOMENCLATURE

- τ : Shear stress
- m : Friction factor
- k : Shear yield stress
- μ : Friction coefficient
- p : Normal pressure



تحلیل رفتار فولاد زنگ‌نزن PH ۷-۱۷ با استفاده از نانوروانکار در فرایند فورج داغ

یاسر مغانی^۱، محمدمراد شیخی^{۲*}، یعقوب دادگر اصل^۳، شهرزاد یوسف‌زاده^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۴- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹

کلید واژگان:

فورج داغ

نانو روانکار

فولاد زنگ‌نزن PH ۷-۱۷

آزمون فشردگی حلقه

شبیه‌سازی اجزای محدود

*نویسنده مسئول: محمدمراد شیخی

پست الکترونیکی:

m.sheikhi@sru.ac.ir

شکل‌دهی مواد از طریق فرایند فورج یکی از روش‌های ساخت است که فلز در آن فشرده می‌شود یا تحت نیروی زیاد قرار می‌گیرد تا قطعات با استحکام بالا ایجاد گردند. پیش از فرایند، برای افزایش جریان فلز، کاهش اصطکاک و ساییدگی، روانکار به قالب اضافه می‌شود و به جدا شدن قطعه نهایی از قالب کمک می‌کند. روانکار در عملیات فورج داغ و روانکاری به‌عنوان یک عامل کلیدی برای افزایش کیفیت تولید است. یکی از بهترین روش‌ها برای مطالعه تأثیر روانکارها در این فرایند، آزمون فشردگی حلقه (RCT) است. در این تحقیق، تأثیر نانوذرات (اکسید آلومینیوم Al_2O_3) و نانو شیشه به‌صورت افزودنی به روغن پایه (SAE ۱۰) در دمای $1050^{\circ}C$ بر رفتار اصطکاکی فولاد زنگ‌نزن PH ۷-۱۷ با استفاده از RCT و آنالیز اجزای محدود (FEA) مطالعه شد. در نهایت اهمیت استفاده از نانوروانکار در فرایند فورج داغ بررسی گردید. نتایج نشان داد که نانوذرات به‌عنوان افزودنی روانکار، عملکرد بهتری نسبت به روانکارهای معمولی (مثل گرافیت) در راستای رفتار اصطکاکی فولاد زنگ‌نزن PH ۷-۱۷ در فرایند فورج داغ دارند و برای فولاد زنگ‌نزن PH ۷-۱۷ در $1050^{\circ}C$ ، فاکتور اصطکاک با افزودن نانوذرات Al_2O_3 حدود ۳۶ درصد و با افزودن نانوذرات شیشه حدود ۴۰ درصد کاهش یافت. بنابراین اضافه کردن نانوشیشه، نتایج بهتری در مقایسه با نانوذرات Al_2O_3 دارد.

مقدمه

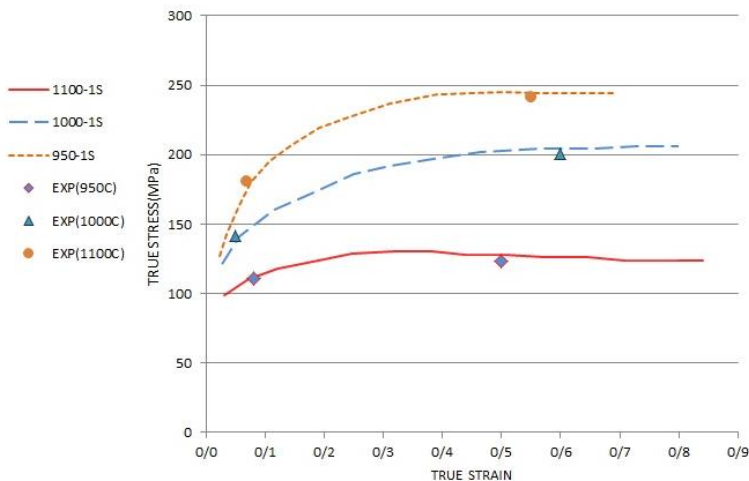
اصطکاک در سطح واسط قالب-قطعه کار یک متغیر مهم است و تأثیرات مهمی بر قطعه کار و متغیرهای عملیات از قبیل بار تغییر شکل، جریان ماده، کیفیت سطح و ساختار داخلی محصول در عملیات شکل‌دهی دارد [۱]. آزمون فشردگی حلقه عموماً به‌عنوان روشی برای اندازه‌گیری اصطکاک بین قطعه کار و قالب استفاده می‌شود. اصولاً به‌صورت یک روش کیفی برای مقایسه شرایط روانکاری بین سطحی، روانکارهای گوناگون بر سطوح اصطکاکی قرار داده می‌شود. استفاده از فناوری نانو انقلابی در قرن اخیر می‌باشد. فناوری نانو می‌تواند در زمینه‌های بسیاری استفاده شود و علم مواد را به سمت پیشرفت‌های جدیدی هدایت کند [۲]. با رشد تکنولوژی و راندمان کمتر روانکارهای معمولی در کاهش اصطکاک، عصر جدیدی از روانکارها به نام نانوروانکارها خلق شده‌اند. نانوروانکارها ترکیب جامد-مایعی از نانوذرات هستند که با اندازه کوچک‌تر از 100 nm در روانکار پایه قرار گرفته‌اند [۳]. اخیراً تحقیقات گسترده‌ای درباره افزودن نانوذرات به روغن‌های پایه و بهبود قابل توجه رفتار اصطکاکی آنها گزارش شده است. وو و همکارانش (۲۰۱۷)، شرایط تریبولوژیکی دو روغن روانکار (روغن API-SF و روغن پایه) را با نانوذرات CuO ، TiO_2 و نانوالماس به‌عنوان افزودنی بررسی کردند [۲]. چوی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که با استفاده از نانوذرات CuO به‌صورت افزودنی در روغن، میانگین ضریب اصطکاک تا حد زیادی کاهش می‌یابد [۴]. ریلسکی و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر نانوذرات به‌ویژه ZrO_2 بر رفتار اصطکاکی روانکارها را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که با افزودن 1 wt درصد نانوذرات ZrO_2 به روغن لیتیم خالص، اصطکاک تا 50% درصد کاهش می‌یابد [۵]. همچنین، استفاده از نانوذرات CuO بیشترین اثر کاهش اصطکاک را در مقایسه با نانوذرات Fe-Co در روغن SAE ۱۰ از طریق آزمایش تریبولوژیکی داشت [۶]. گالما و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که ضریب اصطکاک می‌تواند با افزودن 0.5 wt درصد از نانوذرات Al_2O_3 در روغن پایه تا 22.67% درصد کاهش یابد [۷]. در تحقیق دیگری، با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نشان دادند که افزودن 0.5 wt درصد نانوذرات Al_2O_3 به روانکار معمولی، شرایط روانکاری را به طرز قابل توجهی بهبود می‌بخشد و بار شکل‌دهی را در مقایسه با روانکارهای معمولی 16.39% درصد کاهش می‌دهد [۸]. قاسمعلی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از روش‌های مدل‌سازی کلاسیک برای توصیف فرایندهای فرم‌دهی، دسته‌های مختلف فرایند آهنگری مانند قالب باز، قالب بسته و فورج سردگرم و فورج گرم را بررسی و معایب و مزایای هر کدام را تعیین کردند [۹]. هوی و همکاران (۲۰۱۷) نورد گرم فولاد با درصد آلیاژ کم را در دمای نورد 1050 ، 950 و 850 درجه سانتی‌گراد در شرایط مختلف روانکاری بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از روان‌کننده پایه آب با 4 wt درصد اکسید تیتانیوم، در نورد گرم نه تنها بهترین سطح را تولید می‌کند بلکه باعث نازک‌ترین ذرات اکسید فولادهای نورد شده می‌شود [۱۰]. جانسون و همکاران (۲۰۱۹) فورج گرم آلیاژ برنج CW۲۲۴R با استفاده از روان‌کننده مختلف، از جمله روغن معدنی و روغن نباتی با و بدون افزودن ذرات گرافیتی با اندازه نانو را بررسی کردند و دریافتند که استفاده از نانوذرات نتایج بهتری به همراه دارد [۱۱]. لو و همکاران (۲۰۲۰) فورج تیغه توربین Ti-۶Al-۴V را مطالعه و تأثیر شرایط اصطکاک بر دما و تغییر فاز درون تیغه فورج‌شده به‌صورت عددی را تجزیه و تحلیل کردند و با آزمون‌های تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان داد یک شرایط روانکاری خوب به‌طور مشخص حجم متوسط فاز α را افزایش می‌دهد [۱۲]. آسای و همکاران (۲۰۱۴) روان‌کننده‌های گرافیتی در آهنگری گرم قطعات ساده را با روان‌کننده‌های غیرگرافیتی مقایسه کردند. طی این تحقیق نشان دادند هر روان‌کننده دارای دمای بحرانی کمتر از 450 درجه سانتی‌گراد می‌تواند اصطکاک بین قالب و قطعه 1000 درجه سانتی‌گرادی را کاهش دهد [۱۳]. سوونگ و همکاران (۲۰۲۰) کرنش سطحی بحرانی را برای ارزیابی محدودیت روانکاری مؤثر در شکل‌دهی فلزات بررسی کردند [۱۴]. میرزالو و همکاران (۲۰۱۷) تأثیرات نانوروان‌کننده‌های ساخته شده توسط نانوذرات اکسیدمس و آلومینا بر کیفیت سطح فرایند آهنگری، با استفاده از روش تاگوچی را بررسی کردند. بهترین حالت زمانی به‌دست می‌آید که 0.8 wt درصد نانوذرات CuO را در روان‌کننده

پارافین افزوده بودند [۱۵]. در این تحقیق با افزودن نانوذرات Al_2O_3 و شیشه به روغن SAE ۱۰ به بررسی رفتار تریبولوژیکی فولاد زنگ‌نزن PH ۱۷-۷ در عملیات فورج داغ با استفاده از RCT و FEA پرداخته شد. همچنین اهمیت اضافه کردن نانوذرات به روغن پایه در کاهش اصطکاک برای عملیات فورج داغ فولاد زنگ‌نزن PH ۱۷-۷ بررسی شد.

آزمایش تجربی

مواد آزمایش و روانکارها

RCT به‌منظور بررسی رفتار اصطکاک فولاد زنگ‌نزن PH ۱۷-۷ در عملیات فورج داغ و با استفاده از نانوروانکار و تحت شرایط آزمایشی مختلف (دمای $1050^{\circ}C$ و کاهش ضخامت ۳۰ و ۵۰ درصد) استفاده شده است. منحنی تنش- کرنش فولاد زنگ‌نزن PH ۱۷-۷ در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های تجربی برای تأیید مواد در دماهای مختلف نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. منحنی تنش- کرنش فولاد زنگ‌نزن PH ۱۷-۷.

نمونه‌های استوانه‌ای از فولاد زنگ‌نزن PH ۱۷-۷ به‌منظور تأیید ترکیب مواد و منحنی تنش- کرنش به‌کار رفت. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن PH ۱۷-۷ در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن PH ۱۷-۷.

	Cr	Mn	Si	Ni	P	S	C	Al
MIN	۱۶.۰۰	-	-	۶.۵۰	-	-	-	۰.۷۵
MAX	۱۸.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۷.۷۵	۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۰۹	۱.۵

روانکارهای مورد استفاده در این پژوهش، مطابق جدول ۲ شامل گرافیت، نانوروانکار AL_2O_3 و نانوشیشه در روغن SAE ۱۰ می‌باشد.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی روانکار.

No	Lubricant type
A	Nano-glass (۰.۵ wt%)
B	AL ₂ O ₃ (۰.۵ wt%)
C	SAE ۱۰ oil

در شکل ۲ نمایی از روانکارهای استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایی از روانکارهای مورد استفاده.

مشخصات روغن SAE ۱۰ به عنوان روانکار پایه و نانوذرات در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده‌اند.

جدول ۳. مشخصات روغن SAE ۱۰.

Property	Unit	Value
Density	Kgm ⁻³	۹۴۵
Viscosity kinematic (۴۰ °C)	mm ² /s	۶۰
Viscosity Index		۸۵
Pour Point	°C	-۲۱
Flash Point	°C	۱۹۰

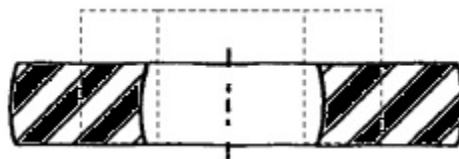
جدول ۳. مشخصات نانوذرات استفاده شده.

Property	Unit	AL ₂ O ₃	Nano-glass
Color		White	white
Measured average particle size	Nm	۲۰	۳۰
Surface area	m ² /g	>۱۳۸	۱۵۰
shape		sphere	sphere

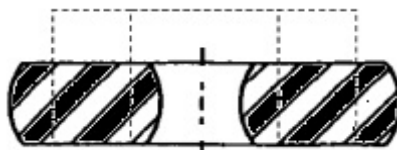
Property	Unit	AL ₂ O ₃	Nano-glass
Purity	%	۹۹	۹۹.۵
Density	g/cm ³	۳.۰۸	۲.۴

روند انجام آزمایش

رویه آزمایش توسط RCT و تحت شرایط مختلف همانند شرایط روانکاری (نانوشیشه و AL₂O₃)، دمای ۱۰۵۰°C و درصد ضخامت (۳۰ و ۵۰ درصد) انجام می‌گیرد. رفتار اصطکاکي مختلف به‌دست‌آمده توسط RCT در شکل ۳ نشان داده شده است.



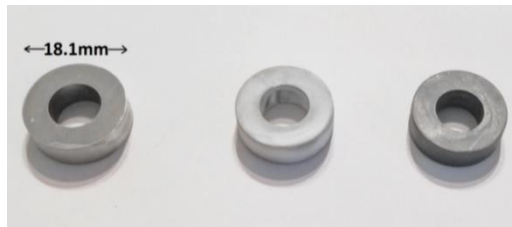
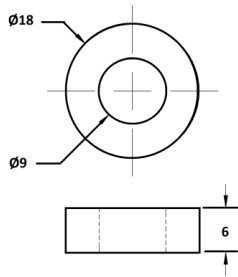
(الف)



(ب)

شکل ۳. شرایط اصطکاکي مختلف در آزمون فشردگی حلقه، (الف) فشردگی با اصطکاک کم، (ب) فشردگی با اصطکاک زیاد.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تغییر در قطرهای داخلی و خارجی حلقه فورج‌شده به میزان بسیار زیادی به اصطکاک در سطح تماس قالب- حلقه بستگی دارد. هرچه کاهش قطر داخلی بیشتر باشد، ضریب اصطکاک بیشتر است؛ زیرا با افزایش اصطکاک، مقاومت اصطکاکي در جهت جریان‌های درونی مواد حلقه به سمت مرکز، از مقاومت اصطکاکي در جهت بیرون کمتر می‌شود. برای انجام آزمون فشردگی حلقه، نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای با نسبت ۶:۳:۲ استفاده شد (قطر خارجی ۱۸ میلی‌متر قطر داخلی ۹ میلی‌متر و ارتفاع ۶ میلی‌متر) به طوری که در شکل ۴ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف) نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای با نسبت ۴:۳:۲، (ب) دستگاه پرس پیچی مورد استفاده برای انجام آزمون‌ها.

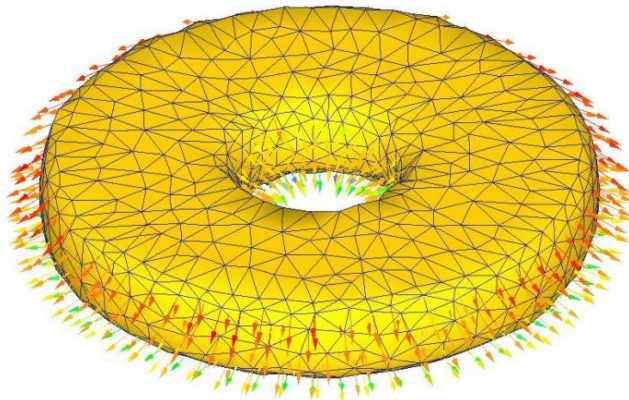
شرایط مختلف برای انجام آزمون RCT در جدول ۴ ارائه شده است. برای دستیابی به نتایج صحیح، آزمایش‌ها چندین بار انجام شده است.

جدول ۴. شرایط مختلف آزمون فشردگی حلقه.

.Test No	۱	۲	۳	۴	۶	۶
Nano-Lubricants type	Graphite	Graphite	AL ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	Nano-glass	Nano-glass
Temperature	۱۰۵۰°C	۱۰۵۰°C	۱۰۵۰°C	۱۰۵۰°C	۱۰۵۰°C	۱۰۵۰°C
Thickness percentage	۳۰%	۵۰%	۳۰%	۵۰%	۳۰%	۵۰%

شبیه‌سازی اجزای محدود

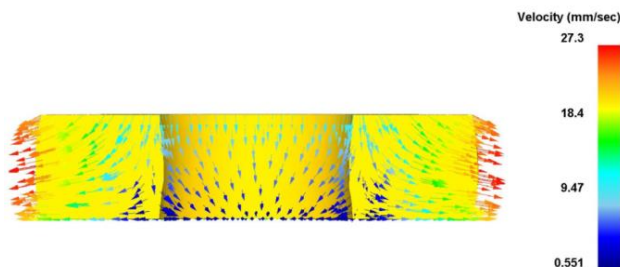
به‌منظور بررسی عددی تأثیر نانوذرات (اکسید آلومینیوم Al_2O_3) و نانوشیشه به‌صورت افزودنی به روغن پایه (SAE ۱۰) در دمای $1050^\circ C$ بر رفتار اصطکاکی فولاد زنگ‌نزن PH ۷-۱۷ در فرایند فورج داغ، یک مدل ۳D برای شبیه‌سازی فرایند فشردگی حلقه در دمای اتاق ایجاد گردید. آنالیز اجزای محدود فرایند توسط نرم‌افزار Deform انجام گرفته است. در مدل اجزای محدود، ماده به‌صورت الاستیک-پلاستیک (الاستوپلاستیک) در نظر گرفته شد. قانون اصطکاک برشی برای تعیین شرایط اصطکاکی استفاده شده و المان‌های مثلثی با اندازه 0.3 mm برای مش نمونه اولیه استفاده شد. دمای نمونه‌ها 1050 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شدند. قالب‌ها به‌صورت اجسام صلب مدل شدند در حالی که نمونه به‌صورت یک جسم با قابلیت تغییر شکل و با استفاده از 10721 المان و 1754 گره مدل شده است. در شکل ۵ نمایی از مدل مش‌بندی شده نشان داده شده است.



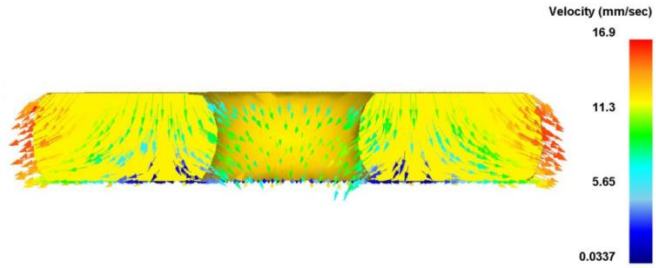
شکل ۴. نمایی از مدل مش‌بندی شده.

بحث و نتایج

جریان فلز برای شرایط مختلف روانکاری و تحت کاهش ضخامت‌های مختلف (۵۰ و ۳۰ درصد) در دمای 1050 درجه سانتی‌گراد در شکل ۶ (الف)، (ب) و (ج) نشان داده شده است. در این شکل نمودار نیرو-زمان برای شبیه‌سازی‌های مختلف ارائه شده است.

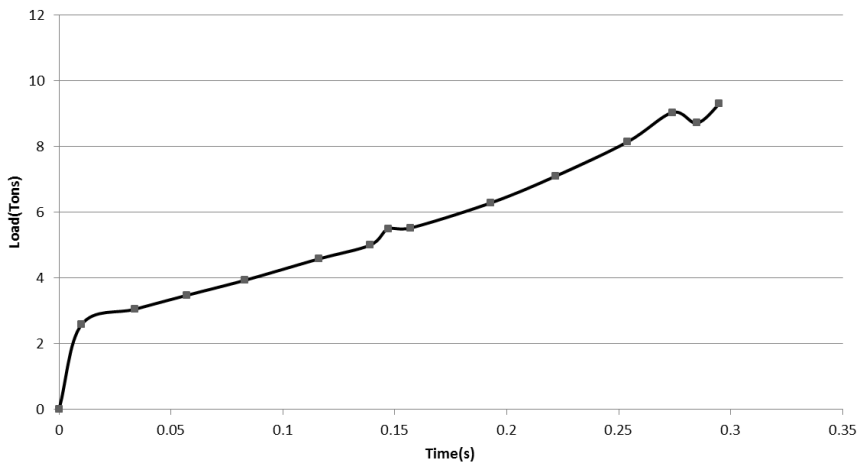


درصد کاهش ضخامت: ۳۰ درصد

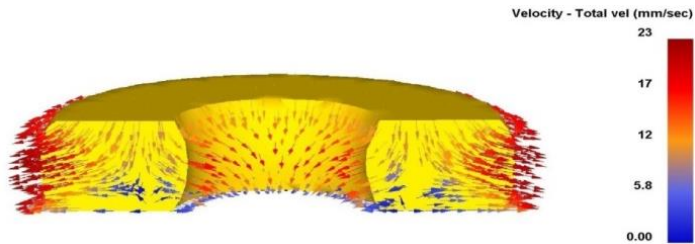


درصد کاهش ضخامت: ۵۰ درصد

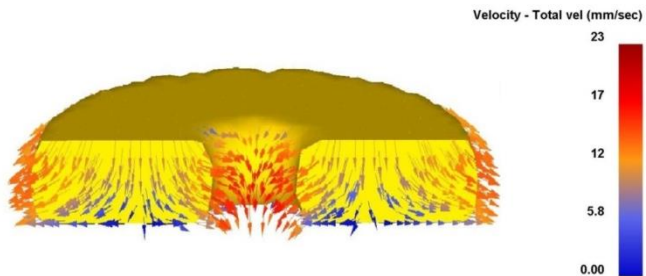
Load-Time(NANO-GLASS)



(الف)

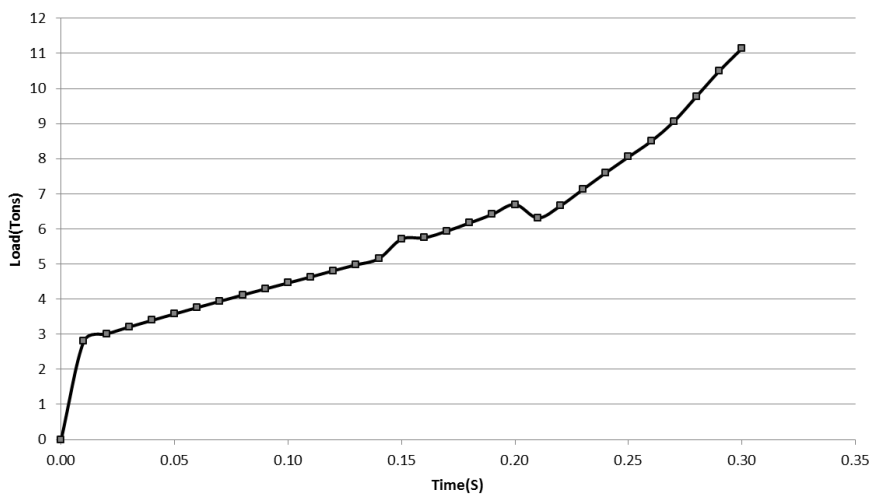


درصد کاهش ضخامت: ۳۰ درصد

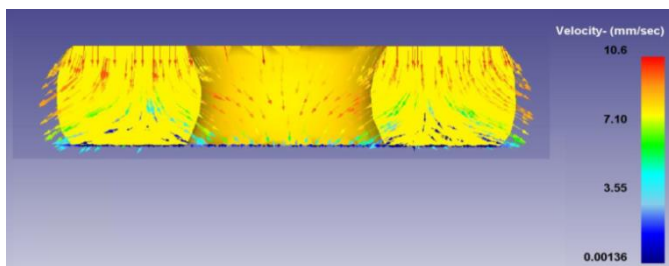


درصد کاهش ضخامت: ۵۰ درصد

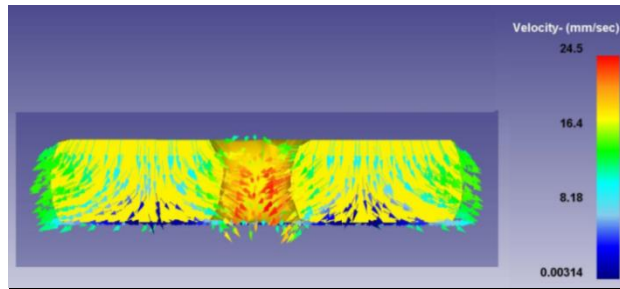
Load-Time(AL2O3)



(ب)

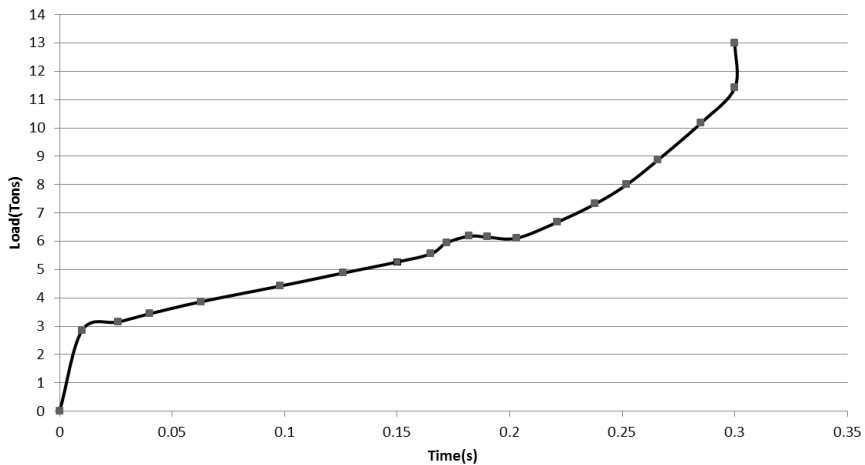


درصد کاهش ضخامت: ۳۰ درصد



درصد کاهش ضخامت: ۵۰ درصد

Load-Time(Graphite)



(ج)

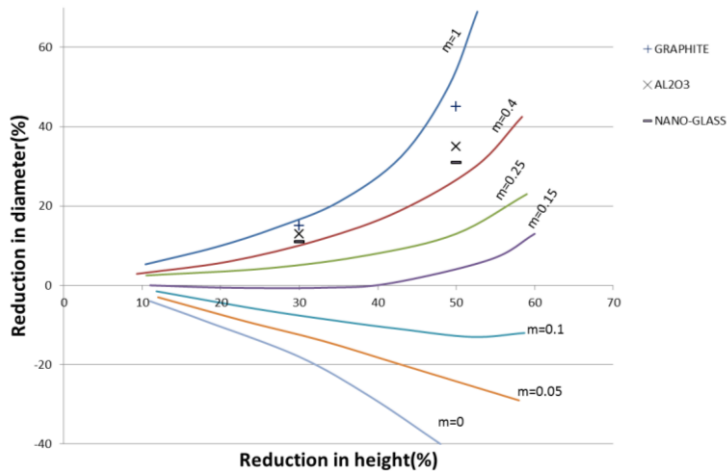
شکل ۶. جریان فلزو نمودار نیرو- زمان برای شرایط مختلف روانکاری و تحت کاهش ضخامت‌های مختلف (۳۰ و ۵۰ درصد) در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد (الف) نانوروانکار شیشه (ب) نانوروانکار (الف) نانوروانکار شیشه (ج) نانوروانکار گرافیت.

مقایسه سه نمودار نیرو- زمان نشان می‌دهد که نیروی کمتری هنگام استفاده از نانوروانکار شیشه در مقایسه با نانوروانکار AL_2O_3 و گرافیت موردنیاز است، همچنین نیروی موردنیاز هنگام استفاده از نانوروانکار AL_2O_3 کمتر از روانکار گرافیت می‌باشد. همچنین این مقایسه نشان می‌دهد مرحله اولیه هر سه نمودار مشابه هستند؛ زیرا در مراحل اولیه تماس در حال ایجاد شدن است و روانکار اثر کمتری دارد. اما بعد از ایجاد فشار توسط قالب بالایی روی قطعه روانکارها مؤثرتر هستند. برای مثال، نیروی موردنیاز در ضخامت ۵ درصد با استفاده از روانکار نانوشیشه حدود ۹ تن، هنگام استفاده از نانوروانکار AL_2O_3 حدود ۱۱ تن و هنگام استفاده از روانکار گرافیت حدود ۱۳ تن است. در جدول ۵ مقایسه کاهش قطر داخلی و قطر خارجی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج تجربی و شبیه‌سازی آزمون فشار حلقه با استفاده از روانکارهای مختلف در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد.

Lubricant type	T (°C)	Height Reduction (%)	Ring Dimensions	Simulation	No. of experiments				Ave. Dim
					۱	۲	۳	۴	
Al ₂ O ₃	۱۰۵۰	۵۰%	Inner Dim.	۵.۹۰	۶.۱۰	۵.۶۰	۵.۹۰	۶.۲۰	۵.۹۰
			Outer Dim.	۲۶.۲۲	۲۴.۷۰	۲۴.۴۰	۲۵.۲۰	۲۵.۱۰	۲۴.۸۰
		۳۰%	Inner Dim.	۷.۴۰	۷.۲۰	۷.۷۰	۷.۳۰	۷.۱۰	۷.۲۲
			Outer Dim.	۲۳.۵۰	۲۳.۱۰	۲۲.۷۰	۲۳.۲۰	۲۳.۴۰	۲۳.۱۰
Nano Glass	۱۰۵۰	۵۰%	Inner Dim.	۶.۲۰	۶.۴۰	۶.۱۰	۶.۲۰	۵.۸۰	۶.۱۲
			Outer Dim.	۲۶.۳۰	۲۴.۹۰	۲۵.۹۰	۲۵.۷۰	۲۶.۳۰	۲۵.۷۰
		۳۰%	Inner Dim.	۷.۰۰	۷.۳۰	۷.۱۰	۷.۹۰	۸.۱۰	۷.۶۰
			Outer Dim.	۲۳.۷۶	۲۳.۲۰	۲۳.۰۰	۲۳.۷۰	۲۳.۲۰	۲۳.۳۰
Graphite	۱۰۵۰	۵۰%	Inner Dim.	۳.۹۰	۳.۰۰	۳.۳۰	۳.۳۰	۲.۶۰	۳.۳۰
			Outer Dim.	۲۲.۷۷	۲۲.۰۰	۲۱.۴۰	۲۱.۲۰	۲۱.۵۰	۲۱.۵۰
		۳۰%	Inner Dim.	۶.۵	۷.۲۰	۷.۰۵	۶.۸۰	۷.۰۰	۷.۰۰
			Outer Dim.	۱۹.۹۸	۱۸.۴۰	۱۸.۷۰	۱۹.۵۰	۱۹.۴۰	۱۹.۰۰

در نهایت اهمیت استفاده از نانوذرات در روغن پایه SAE ۱۰ و برای درصد ضخامت‌های مختلف (۳۰ و ۵۰ درصد) در دمای ۱۰۵۰°C به صورت نمودار کالیبراسیون در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، افزودن نانوذرات Al₂O₃ و نانوشیشه در روغن پایه SAE ۱۰ رفتار اصطکاکی بهتر (فاکتور اصطکاکی کمتر) نسبت به روانکار معمولی (گرافیت) دارد. منحنی کالیبراسیون اصطکاکی فولاد زنگ‌نزن PH ۷-۱۷ در ۱۰۵۰°C در شکل ۶ با استفاده از شبیه‌سازی FE رسم شده است.



شکل ۷. نمودار کالیبراسیون فولاد زنگ‌زن PH ۱۷-۷ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به تأثیر نانوذرات (اکسیدآلومینیوم (AL_2O_3) و نانوشیشه) به صورت افزودنی به روغن پایه (SAE ۱۰) در دمای ۱۰۵۰°C بر رفتار اصطکاکی فولاد زنگ‌زن PH ۱۷-۷ در فرایند فورج داغ با استفاده از روش آزمون فشردگی حلقه (RCT) و آنالیز اجزای محدود (FEA) پرداخته شده است. اهم نتایج به‌دست‌آمده عبارتند از:

- ۱- استفاده از نانوروانکارها (نانوذرات AL_2O_3 و شیشه) در مقایسه با روانکار معمولی (گرافیت) اثر قابل توجهی بر رفتار اصطکاکی فولاد زنگ‌زن PH ۱۷-۷ در فرایند فورج داغ دارند.
- ۲- نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان دادند که میانگین اختلاف قطر داخلی و بیرونی رینگ، بین FEA و RCT حدود ۵ درصد است اما نتایج روش FEA قابل‌اعتمادتر از RCT است.
- ۳- برای فولاد زنگ‌زن PH ۱۷-۷ در ۱۰۵۰°C، فاکتور اصطکاک با افزودن نانوذرات AL_2O_3 حدود ۳۶ درصد و با اضافه کردن نانوذرات شیشه حدود ۴۰ درصد کاهش یافته است؛ بنابراین افزودن نانوشیشه نتایج بهتری از نانوذرات AL_2O_3 دارد.
- ۴- استفاده از منحنی کالیبراسیون روش مناسبی برای مقایسه رفتار اصطکاکی انواع روانکارها در این فرایند می‌باشد.

References

- [1] Rajesh, E., & SivaPrakash, M. (2013). Analysis of friction factor by employing the ring compression test under different lubricants. *International journal of scientific & engineering research*, 4(5), 1163-1170. <https://akbis.gantep.edu.tr/yonetim/upload/files/7647-8669.pdf>
- [2] Wu, Y. Y., Tsui, W. C., & Liu, T. C. (2007). Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives. *Wear*, 262(7), 819-825. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.021>

- [3] Wang, X-Q., & Mujumdar, A. S. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>
- [4] Choi, Y., Lee, C., Hwang, Y., Park, M., Lee, J., Choi, C., & Jung, M. (2009). Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil. *Current Applied Physics*, 9(2), 124-127. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2008.12.050>
- [5] Rylski, A., & Siczek, K. (2020). The Effect of Addition of Nanoparticles, Especially ZrO₂-Based, on Tribological Behavior of Lubricants. *Lubricants*, 8(3), 23. <https://doi.org/10.3390/lubricants8030023>
- [6] Padgurskas, J., Rukuiza, R., Prosyčevs, I., & Kreivaitis, R. (2013). Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles. *Tribology International*, 60, 224-232. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.10.024>
- [7] Ghalme, S., Koinkar, P., & Bhalerao, Y. J. (2020). Effect of aluminium oxide (Al₂O₃) nanoparticles addition into lubricating oil on tribological performance. *Tribology in Industry*, 42(3), 494-502. <https://doi.org/10.24874/ti.871.04.20.07>
- [8] Zareh-Dsari, B., Abaszadeh, M., & Davoodi, B. (2015). Lubrication enhancement in deep drawing process by utilizing nanoparticle additives. *Modares Mechanical Engineering*, 15(1), 317-322. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-2207-en.html>
- [9] Ghassemali, E. (2022). Forging of metallic parts and structures. In *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00148-4>
- [10] Wu, H., Zhao, J., Xia, W., Cheng, X., He, A., Yun, J. H., Wang, L., Huang, H., Jiao, S., Huang, L., Zhang, S., & Jiang, Z. (2017). Analysis of TiO₂ nano-additive water-based lubricants in hot rolling of microalloyed steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 27, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.011>
- [11] Johansson, J., Gutnichenko, O., Ståhl, J. E., Bushlya, V., & Schultheiss, F. (2019). Determining process parameters for successful material reclamation of lead-free brass chips using hot forging operations: Lubrication. *Procedia CIRP*, 80, 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.086>
- [12] Luo, S., Wang, Q., Zhang, P., Li, J., & Liu, Q. (2020). Effect of friction conditions on phase transformation characteristics in hot forging process of Ti-6Al-4V turbine blade. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2107-2115. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.041>
- [13] Asai, K., & Kitamura, K. (2014). Estimation of Frictional Property of Lubricants for Hot Forging of Steel Using Low-speed Ring Compression Test. *Procedia Engineering*, 81, 1970-1975. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.266>
- [14] Lee, S., Lee, J., & Joun, M. (2020). On critical surface strain during hot forging of lubricated aluminum alloy. *Tribology International*, 141, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105855>
- [15] Alimirzaloo, V., SheydayiGurchinQaleh, S., MashhadiKeshtiban, P., & Ahmadi, S. (2017). Investigation of the effect of CuO and AL₂O₃ nanolubricants on the surface roughness in the forging process of aluminum alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 231(12), 1595-1604. <https://doi.org/10.1177/1350650117702816>