



## بررسی اثر تعداد پاس و طراحی ابزار در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر اندازه دانه، سختی و مقاومت سایشی فولاد Ck45

محمد جواد مرزبان<sup>1</sup>، سید احمد به گزین<sup>2</sup>، مازیار جانقربان<sup>3</sup>، احمد افسری<sup>4\*</sup>

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ساخت و تولید، گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز - دانشگاه آزاد اسلامی - شیراز، ایران.

2- استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی باهنر شیراز - دانشگاه فنی و حرفه‌ای - شیراز - ایران.

3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.

4- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز - دانشگاه آزاد اسلامی - شیراز، ایران.

\* شیراز، صندوق پستی 71365-364، Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

فرآیند اصطکاک-اغتشاشی برای اصلاح ساختار و خواص آلیاژهای آلومینیوم، مس، منیزیم و فولادها بکار گرفته شده است ولی میزان تحقیقات مرتبط با فولاد در این مورد بسیار کمتر است. با توجه به این که فولادها علاوه بر آلیاژهای آلومینیوم، مس و منیزیم دارای خواص مهندسی خوب و کاربردهای بسیار فراوان در صنعت هستند، نیاز به بررسی بیشتر انواع فولاد با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی احساس می‌شود. در این رابطه، تحقیق حاضر به بررسی تاثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر اندازه دانه، سختی و مقاومت سایشی فولاد Ck45 در اثر تغییر تعداد پاس و طراحی ابزار می‌پردازد. در این تحقیق نشان داده شد که روش اصطکاکی اغتشاشی روش مؤثری برای افزایش سختی و مقاومت سایشی در این فولاد می‌تواند باشد به گونه‌ای که افزایش تعداد پاس باعث تولید حرارت بیشتر بر واحد طول شده و همچنین باعث تأثیرگذاری بر اندازه دانه‌ها، سختی و احتمالاً نفوذ اتمی می‌گردد. بطور کلی در فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی با افزایش تعداد پاس، اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی بزرگتر می‌شود در حالی که سختی نهایی و مقاومت سایشی تحت تأثیرات مشترک اندازه دانه و سختی تعیین می‌گردد. نتایج حاکی از آن است که سختی تا 42 درصد افزایش و میزان سایش تا 85 درصد نسبت به نمونه اولیه توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی کاهش یافته است.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 11 مهر 1401  
داوری اولیه: 11 آبان 1401  
پذیرش: 30 آبان 1401

### کلیدواژگان:

فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی  
فولاد Ck45  
اندازه دانه  
سختی  
مقاومت سایشی

## Investigating the Effect of the Number of Passes and Tool Design in the Friction-Stirring Process on the Grain Size, Hardness and Wear Resistance of Ck45 Steel

Mohammad Javad Marzban<sup>1</sup>, Seyed Ahmad Behgozin<sup>2</sup>, Maziar Janghorban<sup>3</sup>, Ahmad Afsari<sup>4\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch - Islamic Azad University - Shiraz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shiraz Bahonar Engineering College, Technical and Vocational University (TVU), Shiraz, Iran;

3- Department of Mechanical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

\* P.O.B. 71365-364 shiraz, Iran, Ah.Afsari1338@iau.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 3 October 2022  
First Decision: 2 November 2022  
Accepted: 21 November 2022

### Keywords:

Friction-stirring process  
Ck45 steel  
Grain size  
Hardness  
Wear resistance

### Abstract

Friction stir processing is widely used for improvement of properties and microstructure of Aluminum, Copper and Magnesium alloys but investigation on steels are limited. Due to the fact that steel alloys, in addition to aluminum, copper and magnesium alloys, have good engineering properties and vast applications in the industry, they need to be processed by friction-stirring process. In this regard, the present research examines the effect of frictional stirring process on grain size, hardness and wear resistance of Ck45 steel due to the number of passes and tool design. In this research, it was shown that the friction-stirring method can be an effective method to increase the hardness and wear resistance of this steel in such a way that increasing the number of passes causes more heat generation per unit length and also affects the grain size, hardness and probably atomic penetration. In general, with the increase in the number of passes, the size of the grains in the stirring area becomes larger, while the final hardness and wear resistance are determined under the joint effects of grain size and hardness. The results indicate that the hardness has increased by 42% and the amount of wear has decreased by 85% compared to the original sample by the frictional stirring process.

### 1- مقدمه

علت مصرف انرژی کم، کاهش آلاینده‌گی زیست محیطی را در پی دارد. اما علی‌رغم این مزایا عیوبی که در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به وجود می‌آید ممکن است خطرناک باشد ولی با کنترل صحیح پارامترهای فرآیند می‌توان این عیوب را کاهش داده و یا از تشکیل آن جلوگیری نمود [1].

مدت‌ها است که ایجاد حرارت ناشی از اصطکاک، به عنوان روش اتصال، فرآوری و ایجاد تغییرات میکروساختاری در مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد که از مهمترین مزایای آن ایجاد ناحیه تحت تأثیر حرارت بسیار کوچک در قطعه بوده و علاوه بر این به

### Please cite this article using:

M. J. Marzban, S. A. Behgozin, M. Janghorban, A. Afsari, Investigating the Effect of the Number of Passes and Tool Design in the Friction-Stirring Process on the Grain Size, Hardness and Wear Resistance of Ck45 Steel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 7, pp. 30- 39, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سختی ناحیه نرم شده از 28 به 20 سختی ویکرز با افزایش سرعت عرضی ابزار، کاهش یافته است. نتایج آزمون کششی نشان داد که استحکام نهایی اتصالات کمتر از فلز پایه بوده و با افزایش سرعت عرضی ابزار افزایش می‌یابد.

کومار و همکاران [7] تأثیر جنس ابزار در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی خواص مکانیکی و ریزساختاری قطعه‌ای از جنس فولاد ضد زنگ 316 L با اتصالات لب به لب را مورد مطالعه قرار دادند. عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دو ابزار تنگستنی مختلف که دارای شانه و پین یکسان بودند، انجام شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که اتصال ایجاد شده با استفاده از ابزار تنگستن - اکسید لانتانیم دارای خواص مکانیکی و ریزساختاری بهتری در مقایسه با اتصالات حاصل شده با استفاده از ابزار آلایژ تنگستنی است. علاوه بر این، مطالعه سایش ابزار نشان می‌دهد که ابزار از جنس تنگستن - اکسید لانتانیم با از دست دادن جرم بیشتر در معرض ابتلا به تخریب توسط تغییر شکل پلاستیک است در حالی که ابزار آلایژ تنگستنی بیشتر مستعد تخریب توسط پدیده سایش است.

خادمی و افسری [8] تأثیر تغییر سرعت پیشروی را بر عمر ابزار در فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی بررسی نموده‌اند. نتایج نشانگر آن است که با افزایش سرعت پیشروی در سرعت دورانی ثابت و کاهش حرارت تولیدی، عمر ابزار نیز افزایش می‌یابد.

عزیزیه و همکاران [9] تأثیر پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روی ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه اغتشاشی را مورد بررسی قرار داده‌اند. بهبود سیلان مواد با افزایش سرعت چرخش منجر به از بین رفتن حفرات ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی گردیده است. همچنین در این عملیات با به کارگیری ابزار رزوه‌دار به دلیل بیش‌ترین سیلان مواد، بی‌عیب‌ترین حالت از نظر عدم وجود حفرات حاصل گردید. همچنین به دلیل تغییر شکل بیش‌تر مواد در حالت استفاده از ابزار رزوه دار، مکان‌های جوانه‌زنی و تبلور مجدد دینامیکی بیشتر شده و در نتیجه کوچکترین اندازه دانه در این حالت حاصل گردیده است.

به طور کلی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، نوعی فرآیند حالت جامد است که برای ایجاد تغییرات میکروساختاری، بهبود خواص مکانیکی و تریبولوژیکی در مواد به کار رفته است و عرض ناحیه تحت تأثیر حرارت در این فرآیند بسیار کوچک می‌باشد. در این رابطه مطالعات بسیار کمتری در خصوص تأثیرات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی فولاد Ck45 نسبت به آلیاژهای آلومینیوم - منیزیم و مس انجام شده است بنابراین هدف از این

مهمترین پارامترهای مؤثر بر خواص جوش در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخش یا دوران ابزار بر حسب دور در دقیقه و سرعت پیشروی ابزار بر حسب میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. برای رسیدن به محدوده تغییر شکل پلاستیک مواد، حرارت و دمای کافی مورد نیاز بوده و در صورتی که دمای ماده تحت فرآیند به میزان کافی بالا نرود، عملیات ناقص بوده و منجر به ایجاد عیب می‌گردد. از طرف دیگر اگر گرمای اصطکاکی به وجود آمده در واحد طول بیش از حد افزایش یابد، ماده متخلخل شده و خواص نهایی آن افت می‌کند. یکی از پارامترهای مهم برای رسیدن به پردازش با کیفیت در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، انتخاب مناسب سرعت دوران ابزار نسبت به سرعت پیشروی آن است. تحقیقات انجام شده نشان داده که هر آلایژ در محدوده مشخصی از این نسبت می‌تواند به پردازشی با خواص مطلوب منتهی شود [2]. علاوه سطح مقطع پین و شانه و جنس ابزار و طراحی ابزار و نیروی عمودی اعمالی نیز بر خواص مناطق مختلف فرآیند تأثیرات جدی دارند [3, 4].

ربیعی زاده و همکاران [5] تأثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص بین سطحی و مکانیکی فولاد کم کربن AISI 1010 را بررسی کرده‌اند. با اعمال فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی دانه‌بندی ساختار، تحت مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی از 10 میکرومتر اولیه تا ابعاد 5 میکرومتر کوچک شده است. همچنین استحکام کششی نمونه‌های فرآوری شده در شرایط بهینه فرآیند تا 50 مگاپاسکال افزایش داشت به همین ترتیب سختی نمونه‌های فرآوری شده نیز بیش از 2/5 برابر فلز پایه افزایش داشت. با بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها در اثر فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، رفتار سطحی نیز بهبود پیدا کرده و نرخ سایش نمونه‌ها حدود 28 درصد کاهش یافته است.

محمدی نیا و همکاران [6] در تحقیقی، تأثیر سرعت عرضی ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد دوفازی با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار داده‌اند. بررسی ریزساختاری نشان داده که ناحیه هم‌زن از بینیت، فریت سوزنی و فریت چندضلعی تشکیل شده است. همچنین مشخص شد که منطقه متأثر از گرما بر اساس دمای اوج می‌تواند به سه منطقه مختلف شامل داخلی، که در آن Tp بالاتر از Ac3 است، میانی، جایی که Tp بین Ac1 و Ac3 قرار دارد و خارجی که در آن Tp کمتر از Ac1 است، تقسیم شود. همچنین مشخص شد که فاز مارتنزیت در منطقه متأثر از گرمای خارجی تمدید می‌شود و با افزایش سرعت عرضی ابزار، درجه حرارت کاهش می‌یابد. این نتایج با اندازه‌گیری‌های ریزسختی تأیید شد که در آن کاهش

قطعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که بیشتر در معرض بارگذاری‌های شدید خمشی، کششی، پیچشی و همچنین بارهای ضربه‌ای قرار دارند و به همین دلیل بیشتر در ساخت قطعاتی از قبیل پین‌ها، محورهای چرخنده و میل لنگ استفاده می‌شود. قبل از این که این قطعه تحت عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی قرار گیرد، آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی و خواص شیمیایی روی آن انجام گرفته است. آنالیز شیمیایی به روش طیف سنجی نشر اتمی جرقه‌ای انجام شده است. ترکیب شیمیایی فولاد CK45 بر حسب درصد وزنی عناصر و خواص مکانیکی در جدول 1 ارائه شده است. آزمایش سختی در چند نقطه بر روی قطعه اولیه انجام شده و سختی متوسط 190 ویکرز محاسبه شده است.

قطعه مورد استفاده به شکل ورق مکعب مستطیل به طول و عرض 200×100 میلی‌متر و ضخامت 6 میلی‌متر می‌باشد.

برای ایجاد سطح صاف و عدم وجود اعوجاج و پیچیده‌گی قبل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، قطعات تحت عملیات ظریف فرزکاری، سنگ‌زنی و تمیزکاری سطحی قرار گرفتند. ابعاد ابزار و شکل هندسی آن از مهمترین متغیرهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی است. شکل هندسی ابزار بر روی میزان انرژی مصرفی و حرارت تولیدی فرآیند تأثیر بسزایی دارد، جنس ابزار مورد استفاده در این تحقیق برای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی کاربید تنگستن-کبالت (WC-13%Co) انتخاب گردید و از دو نوع پین دارای شکل‌های هندسی با سطح مقطع دایره‌ای و مربعی استفاده شده است. ابزارها با طول 143 و قطر 18 میلی‌متر طراحی شدند. پین مخروطی شکل با سطح مقطع دایره‌ای، دارای طول 3 میلی‌متر و قطر ابتدایی 1/5 و انتهای 2/5 میلی‌متر است و پین مخروطی شکل با سطح مقطع مربعی، دارای طول 3 میلی‌متر و ابعاد ابتدایی 3×3 و انتهای 5×5 میلی‌متر می‌باشد (شکل 2).

دستگاه استفاده شده در این تحقیق، ماشین فرزندمودی TOZ بوده که دارای سه محور حرکتی می‌باشد. برای هر مرحله آزمایش، عملیات با 1، 2 و 4 پاس همراه بوده است. کل عملیات به اختصار در جدول 2 ارائه گردیده است.

تحقیق بررسی خواص مکانیکی و تریبولوژیکی فولاد Ck45 بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در اثر تعداد پاس و طراحی ابزار می‌باشد. در تحقیق حاضر داده‌های ورودی این فرآیند شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی، تعداد پاس، زاویه انحراف و عمق نفوذ پین می‌باشد تا با انتخاب پارامترهای مناسب، قطعه‌ای با پردازش مطلوب و با کارایی بالا حاصل گردد.

## 2- مواد و روش‌ها

عملیات آزمایشگاهی شامل آماده‌سازی نمونه‌ها، انتخاب ماشین مورد استفاده برای انجام فرآیند و انتخاب پارامترهای ورودی، طراحی و ساخت ابزار و قید و بست و همچنین آماده‌سازی قطعات می‌باشد. همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، در فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی ابزار در حال چرخش به سمت قطعه مهار شده پایین آمده و تا جایی که شانه ابزار به سطح بالایی قطعه بچسبد، پین ابزار به درون قطعه نفوذ کرده و پس از مدت زمان کوتاهی برای پیش‌گرم شدن قطعه، سپس حرکت رو به جلوی ابزار شروع می‌شود و ابزار در طول خط اتصال حرکت کرده و در انتهای مسیر ابزار به سمت بالا کشیده شده و از درون قطعه خارج می‌گردد.

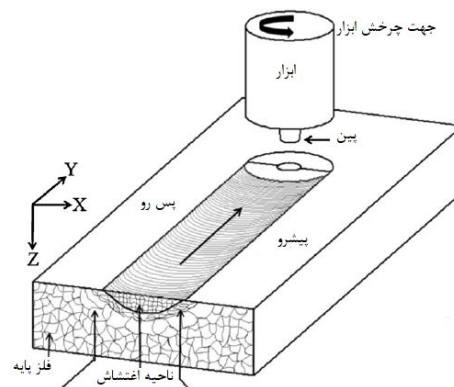


Fig. 1 Diagram of how the friction-stirring process works

شکل 1 نمودار نحوه عمل‌کرد فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

در این تحقیق از ورق فولادی Ck45 به عنوان نمونه استفاده گردیده و با انجام آنالیز کوانتومتری درصد عناصر تشکیل دهنده آن مشخص گردیده است. معمولاً این نوع فولادها در ساخت

جدول 1 ترکیب شیمیایی بر حسب درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده ورق فولادی Ck45

Table 1 Chemical composition in terms of weight percentage of the elements that forming Ck45 steel sheet

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
پایه	0/430	0/267	0/572	<0/010	<0/010	0/059	<0/010
Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
0/035	0/014	<0/010	0/072	<0/005	0/001	<0/005	<0/025

سرعت دورانی ابزار، 1800 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 11/2 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب گردید. داده های ورودی این فرآیند شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی، تعداد پاس، زاویه انحراف و عمق نفوذ پین به اختصار در جدول 3 ارائه گردیده است. در همین رابطه برای عملیات چند پاسه، پس از اتمام هر پاس به قطعه کار و ابزار فرصت داده شد تا خنک گردند.



Fig. 2 Cylindrical tungsten carbide tool pin with circular and square cross section

شکل 2 ابزار کاربید تنگستن با پین استوانه‌ای با سطح مقطع دایره‌ای و مربعی



Figure 3 Conducting the operation of the friction-stirring process and recording the temperature of the work piece

شکل 3 انجام عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و ثبت دمای قطعه کار

جدول 2 نمونه های آزمایشی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

Table 2 Experimental samples of the friction-stirring process

ابزار استوانه ای مخروطی با پین دارای سطح مقطع مربعی		
1 پاس N4	2 پاس N5	4 پاس N6
ابزار استوانه ای مخروطی با پین دارای سطح مقطع دایره‌ای		
1 پاس N10	2 پاس N11	4 پاس N12

قطعه‌ای که قرار است عملیات اصطکاکی اغتشاشی بر روی آن انجام شود، شیار به عرض 2 و عمق 2 در مسیر عملیات بر روی سطح آن ایجاد شده است. به منظور اندازه‌گیری دمای شروع فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی، ترموکوپل در یک سوراخ به عمق مشخص در قطعه و عمود بر امتداد خط فرآیند به فاصله 10 میلی‌متر از خط فرآیند ایجاد گردید.

قبل از شروع فرآیند، قطعه کار با سنباده نرم شماره 1200 و الکل به دقت تمیز گردیده و سپس این قطعه به صورت طولی و در جهت حرکت محور میز در سر جای خود محکم نگه داشته شد. برای سیلان بهتر فلز مومسان در حین عملیات، محور ابزار تحت زاویه 2/5 درجه‌ای نسبت به خط عمود بر قطعه کار در نظر گرفته شد (شکل 3).

جدول 3 انتخاب پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

Table 3 Selection of parameters of friction-stirring process

ملاحظات	عمق نفوذ پین (میلی‌متر)	زاویه انحراف (درجه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر در دقیقه)	سرعت دورانی (دور در دقیقه)	شماره قطعه	تعداد پاس
موفق	3	2/5	11/2	1800	N4	1
ناتمام	3	2/5	11/2	1800	N5	2
موفق	3	2/5	11/2	1800	N6	4
موفق	3	2/5	11/2	1800	N10	1
موفق	3	2/5	11/2	1800	N11	2
موفق	3	2/5	11/2	1800	N12	4

**3- بحث و بررسی نتایج**

پس از انجام فرآیند به روش اصطکاکی اغتشاشی، نمونه‌های استاندارد از قطعات تهیه و برای مطالعه ریزساختار، بررسی خواص مکانیکی و سطحی ناحیه اصطکاکی اغتشاشی، مورد استفاده قرار گرفت. در همین رابطه، ابتدا نمونه‌ها طبق استاندارد مربوط به هر آزمایش، توسط دستگاه تخلیه الکتریکی با سیم به ابعاد لازم برش داده شد. بر روی برخی از نمونه‌ها سیقل کاری، مانیتینگ و اچ کردن نیز برای مشاهده ساختار میکروسکوپی انجام شد.

از دستگاه پولیش آزمایشگاهی مدل ROTOPOL-3S برای سیقل کاری سطح نمونه‌ها استفاده شده است. به منظور مشخص شدن مرز دانه‌ها در نمونه‌ها، محلول نایتال با ترکیب 2 سی سی اسید نیتریک و 98 سی سی اتانول (C2H5OH) مورد استفاده قرار گرفت. از میکروسکوپ نوری شرکت میچی مدل EMZ-5 برای بررسی ریزساختار استفاده گردید و تعیین اندازه دانه‌ها با استفاده از عکس‌های میکروسکوپی و نرم افزار Digimizer انجام گرفت. آزمون سختی در امتداد یک خط در نواحی مختلف سطح مقطع عمود بر خط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و آزمایش سایش با استفاده از دستگاه سایش‌سنج انجام گردید. این آزمایش از نوع پین روی دیسک است که با اعمال نیروی 10 نیوتن بر روی پین و با سرعت چرخش 0/5 متر بر ثانیه به طول 1000 متر برای هر قطعه به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمون، خواص سایشی از روی کاهش وزن نمونه و بررسی نمودار ضریب اصطکاک حاصل می‌گردد. در همین رابطه، نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر 5 میلی‌متر از مرکز قطعه به وسیله دستگاه تخلیه الکتریکی با سیم برش داده شد و بعد با مواد غیر خورنده، سیقل کاری گردید و سپس با دقت 0/0001 گرم وزن گردید و در ادامه تحت آزمون در دستگاه قرار داده شد.

دما نقش مهمی در تعیین ریز ساختار در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی داشته و نتایج حاکی از این است که حرارت ورودی بر واحد طول و در نتیجه دمای ناحیه فرآیند با سرعت دورانی ابزار رابطه مستقیم و با سرعت پیشروی رابطه معکوس دارد. در تمامی نمونه‌ها با رسیدن دمای ترموکوپل به 838 درجه سانتیگراد، عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با یک، دو و چهار پاس شروع گردید تا از مرحله گذرای اول فرآیند جلوگیری شده و در طول فرآیند شرایط دمایی و تغییر شکل یکسانی حاصل گردد. البته دمای مرکز عملیات بیشتر بوده و وابسته به متغیرهای فرآیند می‌باشد.

**3-1- بررسی تغییرات اندازه دانه**

نتایج اندازه دانه برای نمونه‌های فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه اغتشاشی در شکل 4 نشان داده شده است. با توجه به شکل 4 می‌توان نتایج زیر را از تغییرات اندازه دانه‌ها کسب کرد: اندازه دانه‌ها در فلز پایه در تمامی نمونه‌ها در اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بدون تغییر مانده است و برای همه آن‌ها اندازه دانه 10/6039 میکرومتر در نظر گرفته شده است. اندازه دانه‌ها در تمامی نمونه‌ها در ناحیه تحت تأثیر حرارت کوچکتر از اندازه دانه اولیه نمونه شده است میزان این کاهش اندازه دانه تا 52/3 درصد بوده است. در ناحیه متأثر از حرارت، تنها اثرات ناشی از حرارت بر دانه‌ها وجود داشته و اثری از تغییر شکل در این ناحیه مشاهده نگردیده است. بنابراین ریزشدن دانه‌ها در این ناحیه، ناشی از جوانه‌زنی در اثر حرارت ورودی و تنش‌های موجود ناشی از فرآیند تولید ورق در عملیات نوردکاری بوده است.

افزایش تعداد پاس از 1 به 2 در ناحیه تحت تأثیر حرارت باعث کاهش بیشتر اندازه دانه‌ها شده و در مقابل افزایش تعداد پاس‌ها به 4 باعث افزایش اندازه دانه‌ها گردیده است. با افزایش تعداد پاس‌ها در این ناحیه، حرارت ورودی بیشتر شده که در درجه نخست تمایل به جوانه‌زنی بوده و در مرحله بعد به دلیل زیاد شدن طول دوره مربوطه به 4 پاس و همچنین کاهش نقاط دارای تنش است که تمایل به درشت شدن دانه‌ها زیادتر شده است.

اندازه دانه‌ها در تمامی نمونه‌ها در ناحیه اغتشاشی در تمام موارد بزرگتر از اندازه دانه‌ها در ناحیه تحت تأثیر حرارت و نمونه اولیه است. مشاهده شد که اثر حرارت به تنهایی در ناحیه تحت تأثیر حرارت ابتدا باعث کوچکتر شدن و سپس بزرگتر شدن اندازه دانه‌ها می‌شود. تأثیر ترکیبی ورود حرارت بیشتر و وجود تغییر شکل مکانیکی در ناحیه اغتشاشی، موجب رشد اندازه دانه‌ها نسبت به فلز پایه شده است. در ناحیه اغتشاشی تأثیر حرارت بسیار قویتر از تغییر شکل مکانیکی بوده و در نتیجه از پاس اول دانه‌ها بزرگ می‌شوند. بنابراین در شرایط عادی با اعمال پاس‌های بیشتر و تغییر شکل بیشتر شرایط رشد دانه‌ها تسهیل شده و دانه‌ها بزرگ می‌شوند. ریز شدن اندازه دانه‌ها بطور کلی یک پدیده مطلوب بوده و باعث افزایش استحکام، قابلیت انعطاف و چقرمگی یا قابلیت جذب انرژی می‌شود مشخصات نتایج همچنین نشان داد که بهبود قابل توجهی در ریزسختی و مقاومت در برابر سایش به دلیل مکانیسم تقویت دانه و اصلاح ریزساختار می‌باشد و تشکیل لایه اکسیدی نقش مهمی در مقاومت به سایش ایفا می‌کند [10]. در نمونه N12 به مقدار کمتر و در نمونه N11 علی‌رغم بزرگتر شدن اندازه متوسط دانه، تعدادی دانه ریز ناشی از جوانه زنی دینامیکی نیز مشاهده می‌شود.



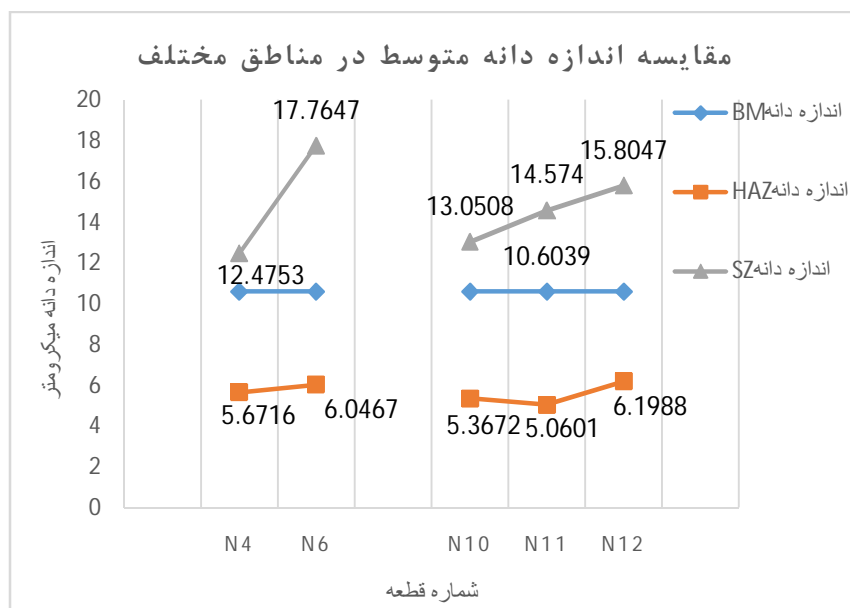


Fig. 4-a How grain size changes in different samples by changing the number of passes with circular and square tools

شکل 4 الف - نحوه تغییرات اندازه دانه در نمونه‌های مختلف با تغییر تعداد پاس با ابزارهایی با سطح مقطع دایره‌ای و مربعی شکل

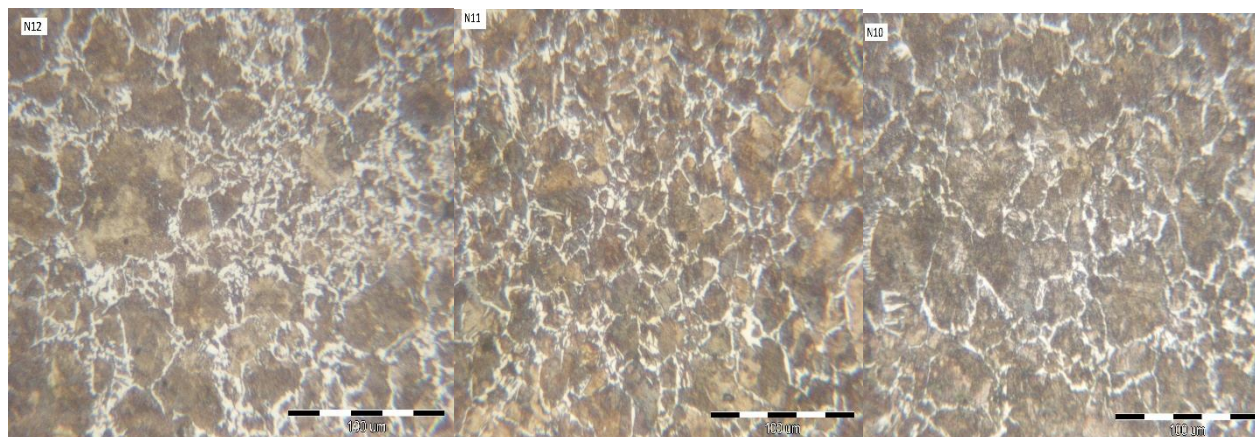


Fig 4-b Grain size images related to samples N10-N11-N12 at Stir Zone

شکل 4 ب- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های N10-N11-N12 در منطقه اغتشاشی نشان دهنده تغییرات اندازه دانه متوسط

### 2-3- بررسی سختی و خواص مکانیکی

تمام نمونه‌ها که تحت عملیات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته بودند جهت بررسی وضعیت ریزسختی تحت نیروی 20 کیلوگرم با روش ویکرزسختی سنجی شدند. این آزمایشات در فواصل 4 میلی‌متر و در 5 ناحیه، یعنی فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت قسمت پیشرو، ناحیه اغتشاشی، فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت قسمت پسرو انجام گردید.

فلز خام اولیه مورد آزمایش بدون فرآوری دارای سختی 190 HV می‌باشد اما تغییرات میزان سختی نمونه‌ها بعد از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی مشهود است، شکل 5 تغییرات میزان سختی نسبت به فلز پایه بعد از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با یک، دو و چهار پاس با دو ابزار با سطح مقطع مربعی و همچنین سطح مقطع دایره‌ای را در پنج نقطه از سطح مقطع

نمونه در نواحی پیشرو و پسرو متأثر از حرارت، ناحیه اغتشاشی و نواحی پیشرو و پسرو فلز پایه نشان می‌دهد. سختی مواد تحت تأثیر عوامل مختلفی می‌تواند تغییر کند. یکی از مهمترین این عوامل اندازه دانه است. علاوه بر اندازه دانه، نفوذ دادن عناصر به سطح یکی از روش‌های سخت کردن سطحی است. عناصر نفوذ کننده با ایجاد مانع در برابر حرکت نابجایی‌ها و ایجاد حوزه‌های فشاری باعث افزایش سختی و افزایش مقاومت قطعات در برابر ایجاد ترک می‌گردند. عامل دیگر در ایجاد سختی، مقدار و نوع فازهای موجود در قطعه است. در فولادهای CK45، با توجه به شرایط مختلف عملیات مکانیکی و حرارتی احتمال داشتن فازهای فریت-پرلیت-سمانتیت و مارتنزیت و بینیت با توجه به شرایط سرد شدن وجود خواهد داشت که مقدار و نوع فازهای موجود می‌تواند به‌شدت سختی را

محسوس تر است. در ناحیه اغتشاشی، تغییرات سختی با تغییر تعداد 1 تا 4 پاس در حد حداکثر 4 واحد ویکرز است، لیکن در این مورد حتی تا 22 واحد افزایش یافته است. دلیل این امر آن است که در ناحیه اغتشاشی از پاس اول به دلیل ورود حرارت خیلی بیشتر به این ناحیه تمامی تغییر فاز بطور کامل انجام شده بود و در نتیجه افزایش پاس بیشتر نمی توانست تغییر عمده‌ای در آن ایجاد کند ولی در ناحیه تحت تأثیر حرارت، اثرات تغییر شکل مکانیکی بر روی تغییر فاز وجود ندارد و حرارت ورودی به این ناحیه نیز کمتر است. بنابراین روند تغییرات سختی مشابه با ناحیه اغتشاشی نیازمند تغییر فاز بوده و با افزایش پاس و افزایش حرارت ورودی و در عین حال زمان تغییر فاز، احتمال تغییر در مقدار و اندازه فازها بیشتر شده و سختی افزایش می‌یابد. تغییرات سختی در ناحیه تحت تأثیر حرارت و پسر (RS) به دلیل تغییرات متأثر از میزان تغییر شکل مکانیکی دارای پیچیدگی بیشتری بوده ولی با توجه به دامنه کوچکتر تغییرات سختی نسبت به حالت پیشرو، می‌توان علت را در اعمال حرارت ورودی و توزیع دمای متفاوت در این حالت جستجو کرد [11].

### 3-3- مقاومت سایشی

رفتار سایشی، نمونه‌ها را می‌توان از طریق نمودار ضریب اصطکاک نسبت به مسافت لغزش با هم مقایسه نمود. سایش بر خلاف خواص ذاتی از قبیل مدول الاستیسیته، یک خواص ذاتی نبوده و به عناصر سیستم سطحی از قبیل دما، سرعت، نیرو، زمان، کیفیت سطح، شرایط محیطی و جنس روانکار و همچنین قطعه کار بستگی دارد.

در نمونه‌ها تغییر دهد. با توجه به ترکیب شیمیایی، کربن معادل فولاد حدود 0/6 درصد وزنی است، بنابراین در شرایط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی که دما به حدود 0/6 تا 0/8 نقطه ذوب می‌رسد می‌تواند وارد ناحیه آستنیتی شده و در مراحل بعدی سرد شدن فازهای غیر تعادلی سخت ایجاد کند.

در تمامی نمونه‌ها در قسمت فلز پایه، هیچ تغییری در سختی نسبت به نمونه اولیه مشاهده نگردیده است. در فلز پایه تغییر شکل مکانیکی وجود نداشته و حرارت نیز دارای کمترین اثر می‌باشد به نحوی که هیچ تغییری در سختی نمونه مشاهده نمی‌گردد. احتمالاً ورود اندک حرارت در این ناحیه، تنها باعث کاهش تنش‌های پسماند می‌تواند باشد. در تمامی نمونه‌ها بالاترین سختی‌ها را در ناحیه اغتشاشی و کمترین سختی را در فلز پایه وجود دارد. پس می‌توان گفت که بطور کلی اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی منجر به افزایش سختی می‌شود. بطور متوسط ناحیه اغتشاشی 42 درصد و ناحیه تحت تأثیر حرارت 12 درصد از فلز پایه سخت‌تر می‌شوند. تغییرات سختی در ناحیه اغتشاشی با افزایش تعداد پاس، اندک بوده و در حد 1 تا 2 درصد است که می‌تواند در اثر انجام شدن کل فرآیند تغییر فاز در پاس اول باشد. تغییرات اندک سختی در پاس‌های بعدی می‌تواند در اثر خروج کربن از زیر ناحیه اغتشاشی (SZ) و نفوذ آن و تبدیل پرلیت یا آستنیت باقیمانده به آستنیت صورت گیرد. اما تغییرات سختی در ناحیه تحت تأثیر حرارت کمی پیچیده‌تر است. در این ناحیه نیز برای قسمت پیشرو تمامی نمونه‌ها با افزایش پاس، مقدار سختی بیشتر می‌شود هر چند میزان این سختی از سختی ناحیه اغتشاشی کمتر است. یک تفاوت مهم در این مورد این است که اختلاف سختی با افزایش تعداد پاس

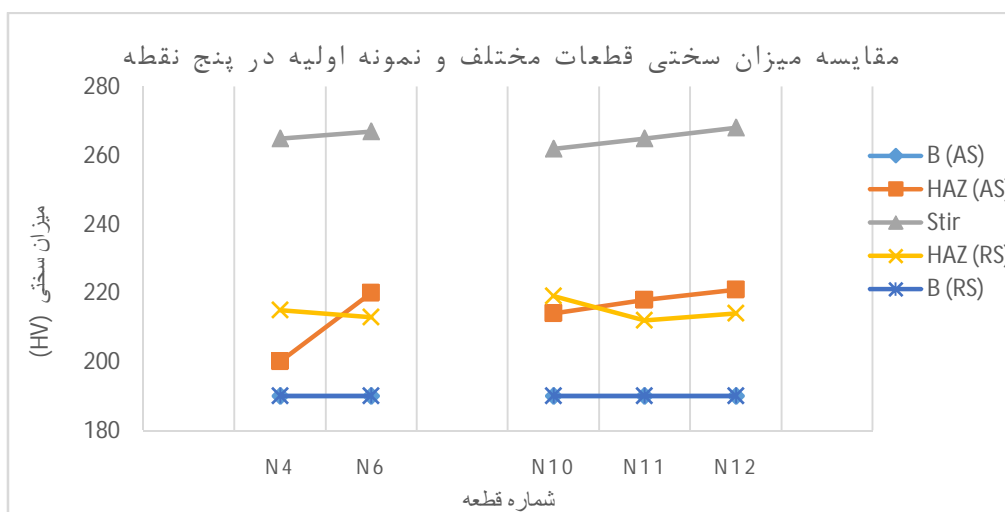


Fig. 5 Comparison of the results of hardness measurement of the surfaces of the samples after the friction-stirring process with one, two and four passes by tools with circular and square cross-sections.

شکل 5 مقایسه نتایج سختی سنجی از سطوح نمونه‌ها بعد از فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی با یک، دو و چهار پاس با ابزارهایی با سطح مقطع دایره‌ای و مربعی.

رویی نمونه‌ها و همچنین سطح پشتی نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های 7 نشان داده شده است. نمونه‌های تست سایش از ناحیه اغتشاشی (SZ) تهیه شده و ضریب اصطکاک و میزان سایش در رو و پشت سطوح ناحیه اغتشاشی بدست آمد. بعد از عملیات فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی در غالب قطعات، ضریب اصطکاک به مقادیر کوچکتر از ضریب اصطکاک نمونه اولیه افت می‌کند. در سطح رویی از ناحیه اغتشاشی (SZ) معمولاً ضریب اصطکاک با افزایش تعداد پاس افزایش یافته و در سطح زیری کاهش می‌یابد و نحوه تغییر در این مورد در سطح زیری و رویی عکس هم خواهند بود. رفتار مشابهی در میزان سایش در سطوح زیری و رویی در نمونه‌ها دیده می‌شود. در نمونه‌های تک پاسه قطعات با شماره N4 و N10 با سطح مقطع مربعی و دایره‌ای، واکنش‌های تغییر فاز تقریباً بطور کامی انجام گرفته و سختی شدیداً رشد کرده و مقاومت سایشی به حداکثر و میزان سایش به حداقل می‌رسد اما در سطح پشتی قطعات با شماره N4 و N10 به دلیل عمود بودن وجود تغییر شکل مکانیکی، تنها اثر حرارت و تغییر فاز عمل کرده و واکنش تغییر فاز به کندی انجام شده و میزان سایش بتدریج کاهش پیدا کرده و مقاومت سایشی افزایش یافته است. در نمونه‌های با شماره N10 تا N12 با تعداد 1 تا 4 پاس رفتار مشابهی دیده می‌شود. به دلیل حرارت زیاد تولید شده در سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی انتخاب شده، ابزار با سطح مقطع مربعی پایداری نداشته و به دلیل حرارت و دمای زیاد سریعاً تغییر شکل می‌دهد. حرارت بیشتر تولید شده در نمونه‌هایی با شماره N4 و N6 باعث رشد سریعتر اندازه دانه در مقایسه با نمونه‌های با شماره N10 تا N12 گردیده است.

چگالی نابعایی‌ها، اندازه دانه و چگونگی توزیع ذرات اضافه شده به ساختار پایه می‌توانند بر رفتار سایشی مؤثر باشند [12]، [13]. افزایش ضریب اصطکاک باعث افزایش حجم مواد ساییده شده در نیروی عمودی ثابت می‌شود به عبارت دیگر کاهش ضریب اصطکاک به معنی افزایش مقاومت در برابر سایش می‌باشد. آزمون سایش با پین 5 میلی متری بر روی دیسکی به شعاع 14/1 میلی‌متر با نیروی 10 نیوتن و سرعت خطی 0/35 متر بر ثانیه و سرعت چرخشی 237 متر بر دقیقه برای مسافت 1000 متر و در دمای اتاق و با هدف به دست آوردن ضریب اصطکاک و نرخ سایش انجام پذیرفت. مقایسه نتایج میانگین ضرایب اصطکاک در سطح رویی و زیری نمونه‌ها در شکل 6 مشاهده می‌شود.

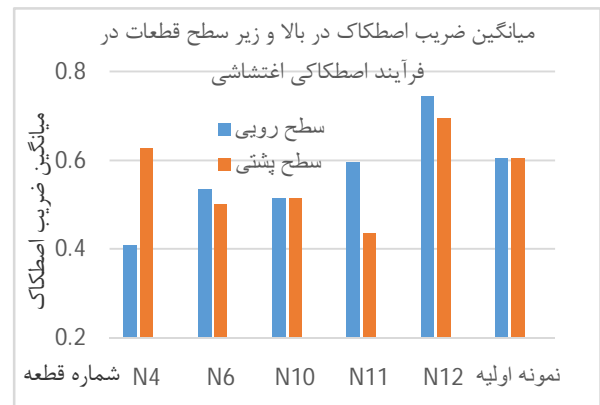


Fig. 6 Comparing the results of the average wear coefficients on the upper and lower surfaces of the samples in the stirred area

شکل 6 مقایسه نتایج میانگین ضرایب اصطکاک در سطوح رویی و زیرین نمونه‌ها در ناحیه اغتشاشی

نمودار کاهش وزن پین در آزمایش سایش بر روی سطح

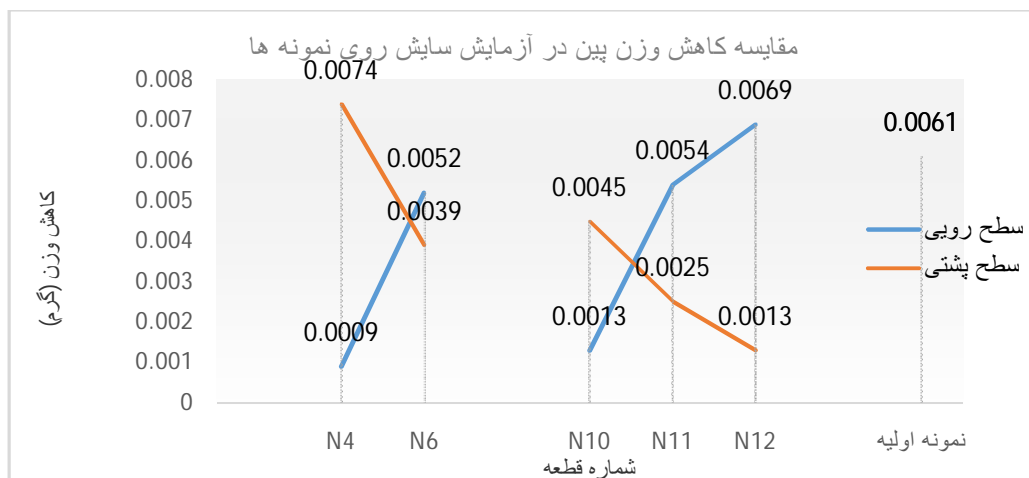


Fig. 7 Pin weight reduction diagram in the wear test on the upper and back surfaces of the samples

شکل 7 نمودار کاهش وزن پین در آزمایش سایش در سطوح رویی و پشتی نمونه‌ها



- در آلیاژهایی مثل فولادها که دمای فرایند بالا است، تغییر شکل ابزار در دمای بالا محتمل بوده و نقش تغییر فاز در تغییر خواص مکانیکی می‌تواند بر اثرات طراحی ابزار و اندازه دانه غلبه کند.

- افزایش تعداد پاس علیرغم بزرگتر کردن دانه ها باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی شده است. علیرغم بزرگتر شدن اندازه متوسط دانه ها، وجود دانه های ریز جدید در کنار دانه های رشد کرده به دلیل جوانه زنی دینامیکی و حرارت بیشتر می‌تواند باعث تغییرات فازی بیشتر و توزیع یکنواخت ذرات فازی نظیر سمانتیت در فولاد و خرد شدن این ذرات و در نتیجه افزایش استحکام و سختی و هموزن کردن خواص گردد.

## 5- مراجع

- [1] Kumar, R., Kumar, H., Kumar, S., & Chohan, J. S. (2022). Effects of tool pin profile on the formation of friction stir processing zone in AA1100 aluminium alloy. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1594-1603.
- [2] Amirafshar, A., & Pouraliakbar, H. (2015). Effect of tool pin design on the microstructural evolutions and tribological characteristics of friction stir processed structural steel. *Measurement*, 68, 111-116.
- [3] El-Sayed, M. M., Shash, A. Y., Abd-Rabou, M., & ElSherbiny, M. G. (2021). Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique: A review. *Journal of Advanced Joining Processes*, 3, 100059.
- [4] Merah, N., Abdul Azeem, M., Abubaker, H. M., Al-Badour, F., Albinmousa, J., & Sorour, A. A. (2021). Friction Stir processing influence on microstructure, mechanical, and corrosion behavior of steels: A review. *Materials*, 14(17), 5023.
- [5] Rabiezadeh, A., Afsari, A., Bahmani, A., & Sohrabizadeh, S. (2018). Effects of Friction Stir Processing on Mechanical, Tribological and Corrosion Resistance of Low Carbon Steel (In persian).
- [6] Mahmoudiniya, M., Kokabi, A. H., Kheirandish, S., & Kestens, L. A. (2018). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded ferrite-martensite DP700 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 737, 213-222.
- [7] Kumar, S. S., Murugan, N., & Ramachandran, K. K. (2020). Effect of tool tilt angle on weld joint properties of friction stir welded AISI 316L stainless steel sheets. *Measurement*, 150, 107083.
- [8] Khademi, A. R., & Afsari, A. (2017). Fabrications of surface nanocomposite by friction stir processing to improve mechanical and microstructural properties of low carbon steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(5), 1193-1198.
- [9] Han, S. Z., Choi, E. A., Lim, S. H., Kim, S., & Lee, J. (2021). Alloy design strategies to increase strength and its trade-offs together. *Progress in Materials*

مقاومت سایشی ارتباط خوبی با سختی جسم دارد. مقاومت سایشی سطح پشت نمونه‌ها کاملاً مخالف با سطح روی نمونه‌ها است. باید توجه شود که کل ناحیه اغتشاشی و بیشتر ناحیه تحت تأثیر حرارت با دمای بالا روی سطح نمونه قرار دارد و بیشتر فلز پایه و ناحیه تحت تأثیر حرارت با دمای کمتر در سطح پشت نمونه قرار واقع شده است. به عبارت دیگر تغییر شکل هیچ اثری بر تغییر ساختار و تغییر فاز در قسمت پشت نمونه نداشته و اثر حرارت نیز در این مورد کوچکتر است و تغییرات فازی احتمالی در قسمت پشتی تنها در اثر حرارت خواهد بود. افزایش تعداد پاس به دلیل قویتر کردن اثر حرارت باعث نرمتر شدن و در نتیجه کاهش مقاومت سایشی نمونه‌ها می‌گردد. بطور کلی مقاومت سایشی را هم می‌توان در این نمونه‌ها بیشتر وابسته به سختی دانست که خود سختی نیز بیشتر وابسته به نوع و مقدار فازهای سخت موجود در ساختار است. تغییرات در مقاومت سایشی نمونه‌ها ممکن است به نفوذ اتمی فاز کربن از سطوح پشتی به سمت سطوح گرمتر بالایی مرتبط باشد. برای انتقال کربن به سطح تنها کافی است که این عنصر از مرز فصل منطقه تحت تأثیر حرارت و منطقه اغتشاشی نفوذ کرده و وارد منطقه اغتشاشی شود. دوران بعدی ابزار باعث انتقال این کربن محلول بصورت یکنواخت به تمام نقاط اغتشاشی خواهد شد.

در هر یک از گروه‌های فوق افزایش تعداد پاس می‌تواند باعث توزیع یکنواخت‌تر فاز سخت سمانتیت در زمینه و کم شدن فاصله این ذرات و خرد شدن احتمالی این ذرات می‌شود.

## 4- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج حاصل شده از این تحقیق عبارت است از:  
- فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روشی مؤثر در افزایش سختی و مقاومت سایشی فولاد CK45 بوده و سختی تا 42 درصد افزایش و میزان سایش تا 85 درصد کاهش می‌یابد.

- نتایج حاصل از رفتار سایشی نمونه‌ها با روش پین بر دیسک در ناحیه اغتشاشی (SZ) نشان داد که مقاومت سایشی فلز با افزایش تعداد پاس در سطح بالایی تمامی نمونه‌ها کاهش و در سطح زیرین نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

- با توجه به تصاویر و نمودارهای حاصل شده می‌توان ادعا کرد که هندسه ابزارعامل مهمی در ایجاد ریزساختار و تغییر اندازه دانه‌ها می‌باشد. همچنین شکل ابزار بر روی میزان حرارت ورودی، ماکزیمم دما، میزان و نحوه تغییر شکل پلاستیکی مواد و خواص مکانیکی می‌تواند مؤثر باشد.

- Composites, 4(4), 426-433.
- [12] Ghadar, S., Momeni, A., Khademi, E., & Kazemi, S. (2021). Effect of rotation and traverse speeds on the microstructure and mechanical properties of friction stir processed 2205 duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: B*, 263, 114813.
- [13] Ahmadifard, S., Momeni, A., Bahmanzadeh, S., & Kazemi, S. (2018). Microstructure, tribological and mechanical properties of Al7075/Ti3AlC2 MAX-phase surface composite produced by friction stir processing. *Vacuum*, 155, 134-141.
- Science, 117, 100720.
- [10] Elayaperumal, A., Arulvel, S., & Khan, M. W. (2021). Assessment on the impact of FSP process parameters on microstructural, mechanical and wear behaviour of FSPed AA6082. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 9(1), 015016.
- [11] Khodabakhshi, E., Kazemi, S., & Ahmadifard, S. (2018). Investigation the mechanical and microstructural properties of copper surface composite Cu/SiO<sub>2</sub> fabricated by friction stir processing. *Journal of Science and Technology of*