

The Effect of the Number of Passes on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti/CNTs Surface Nanocomposite Produced by the Friction Stir Processing (FSP)

Mojtaba Hakakzade¹, Hamid Reza Jafarian^{2*}, Ali Reza Eivani², Seyed Hossein Seyedein²

¹ MSc Student School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

² Associate Professor, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*Corresponding Author's Email: jafarian@iust.ac.ir (Hamid Reza Jafarian)

Paper History:

Received: 2022-12-03

Revised: 2025-01-05

Accepted: 2025-03-05

Keywords:

Friction Stir Welding Process,
Carbon Nanotube,
Twinning,
Surface Nano-composite,
Mechanical Properties

Abstract: In this research, Carbon Nanotubes (CNTs) were incorporated into pure titanium to create a surface nanocomposite using Friction Stir Processing (FSP) method. Initially, through various experiments, the desired linear and rotational speeds were established ($\omega=300$ rpm, $v=180$ mm/min). Subsequently, different process passes were conducted on pure titanium and the surface composite, which was fabricated using a fixed volume percentage of 3.8% carbon nanotubes. The effect of this variable on the mechanical properties and microstructure of both pure titanium and the surface composite was then investigated. The results showed that the optimal ultimate tensile strength and hardness for the surface composite were achieved in the second pass, with values increasing to 512 MPa and 265 Hv, respectively. In contrast, the ultimate tensile strength and hardness of pure titanium were measured at 390 MPa and 45 Hv, respectively. The findings indicated that friction stir processing did not have a noticeable effect on the mechanical properties of pure titanium.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.486560.1311>

URL: https://www.jamt.ir/article_216721.html

1. INTRODUCTION

Friction Stir Processing (FSP), developed from Friction Stir Welding (FSW), enhances the microstructure of pure metals and cast alloys. Research indicates that FSP can completely refine the microstructure of aluminum-silicon alloys, yielding a uniform silicon distribution and an ultimate strength increase of up to 30%. FSP is also used in producing surface composites, such as the AZ series of magnesium alloys reinforced with carbon nanotubes (Hosseini et al., 2015). Further, the obtained results show that the number of FSP cycles positively affects the distribution and fragmentation of carbon nanotubes, improving both mechanical properties and microstructure. This study investigates the impact of cycle count on the microstructure and mechanical properties of titanium-carbon nanotube composites (Liu et al., 2014).

2. MATERIALS AND METHODS

The present study employs Friction Stir Processing (FSP) to produce Ti/CNTs surface composites. The processing parameters, including the number of passes, are varied to investigate their effects on the microstructure and mechanical properties of the composite. The microstructure is characterized using optical microscopy and scanning electron microscopy, while the tensile testing and hardness testing were used to evaluate the mechanical properties. Additionally, this study employed the FSP to modify the microstructure and mechanical properties of titanium and its composite with carbon nanotubes. The processing involved multiple passes, and the effects of each pass on the microstructure

and mechanical properties were examined.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Friction Stir Processing (FSP) is an innovative technique derived from Friction Stir Welding (FSW) that aims to enhance the microstructure of metals and alloys. Research indicates that FSP can significantly refine the microstructure of aluminum-silicon alloys, resulting in an approximate 30% increase in strength. Moreover, FSP is effectively employed to develop surface composites, such as magnesium-aluminum-zinc alloys reinforced with carbon nanotubes. Studies have shown that increasing the number of FSP processing cycles improves the distribution and fragmentation of carbon nanotubes within the matrix, leading to enhanced mechanical properties (Zhang et al., 2008).

This study specifically investigates the impact of varying the number of FSP cycles on the microstructure and mechanical properties of titanium-carbon nanotube composites. Titanium is renowned for its excellent strength-to-weight ratio and corrosion resistance, making it a valuable material in various applications, including aerospace and biomedical fields. The incorporation of carbon nanotubes into titanium matrices can further improve mechanical properties such as strength, ductility, and toughness (Kumar et al., 2008).

In this research, titanium-carbon nanotube composites undergo multiple FSP cycles to assess how these cycles influence their microstructural characteristics and mechanical performance. The process involves using a rotating tool that generates frictional



heat, causing local melting and plastic deformation of the material. This method enables the uniform distribution of carbon nanotubes within the titanium matrix, which is crucial for achieving optimal mechanical properties (Fujii et al., 2010).

Preliminary results suggest that increasing the number of FSP cycles leads to finer microstructures and better dispersion of carbon nanotubes, hence improved mechanical performance. The enhanced properties observed in these composites indicate their potential for use in demanding applications where high strength and lightweight materials are essential (Rios et al., 2010).

In summary, this study highlights the effectiveness of FSP in refining the microstructure of titanium-carbon nanotube composites. Optimizing the number of processing cycles promises significant improvements in mechanical properties, thus paving the way for advanced applications in various industries (Figure 1 and 2). The findings underscore the importance of further research into processing parameters to fully harness the benefits of FSP for composite materials.

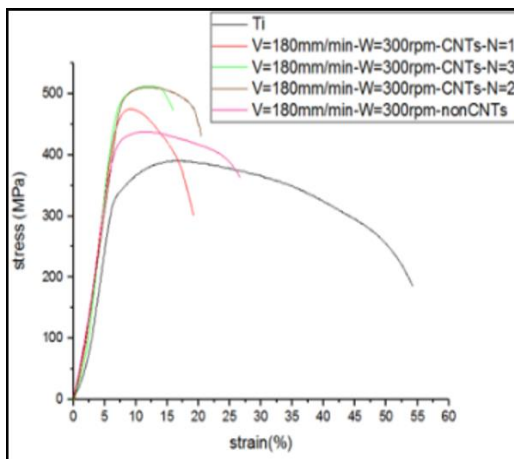


Figure 1. Stress-strain diagram with linear speed of 180 mm/min and rotational speed of 300 rpm and with different number of passes of the friction mixing process

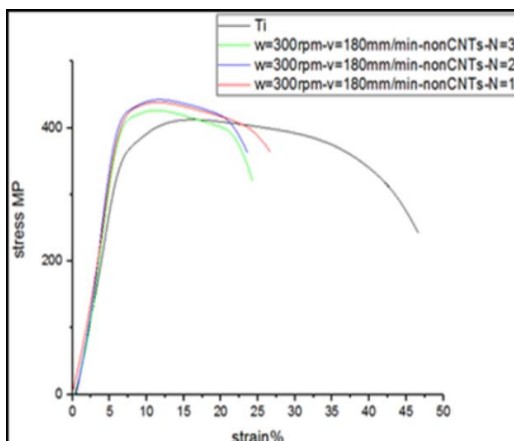


Figure 2. Stress-strain diagram of surface composite with different number of passes of friction mixing process

4. CONCLUSION

The study concludes that the number of passes is a critical parameter in the friction stir processing of Ti/CNT surface composites. An increase in the number of passes leads to a decrease in grain size and an improvement in the distribution of CNTs, resulting in

enhanced mechanical properties. Furthermore, friction stir processing proves to be an effective method for improving the mechanical properties of titanium and its composite with carbon nanotubes. This process facilitates the formation of a fine-grained microstructure and a more uniform distribution of carbon nanotubes, which leads to improved strength and hardness. The study also recommends using simulation software, such as Deform, to validate the initial experimental data. It also suggests that further research should investigate the impact of friction stir processing variables, such as linear speed, rotational speed, and number of passes on the mechanical properties and microstructure of titanium-based surface nanocomposites.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their gratitude to the University of Science and Technology of Iran for its unwavering support of this research.

REFERENCES

- Fujii, H., Sun, Y., Kato, H., & Nakata, K. (2010). Investigation of welding parameter dependent microstructure and mechanical properties in friction stir welded pure Ti joints. *Acta Materialia*, 527(15), 3386–3391. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.02.023>
- Hosseini, S., Ranjbar, K., Dehmolaei, R., & Amirani, A. (2015). Fabrication of Al5083 surface composites reinforced by CNTs and cerium oxide nano particles via friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 622, 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.158>
- Kumar, K. S., & Kailas, S. V. (2008). The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Acta Materialia*, 485(1-2), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.013>
- Liu, Z. Y., Xiao, B. L., Wang, W. G., & Ma, Z. Y. (2014). Analysis of carbon nanotube shortening and composite strengthening in carbon nanotube/aluminum composites fabricated by multi-pass friction stir processing. *Carbon*, 69, 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.12.025>
- Rios, P. R., & da Fonseca, G. S. (2010). Grain Boundary Pinning by Particles. *Materials Science Forum*, 638-642, 3907–3912. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.638-642.3907>
- Zhang, Y., Sato, Y. S., Hiroyuki Kokawa, Seung, & Hirano, S. (2008). Stir zone microstructure of commercial purity titanium friction stir welded using pcBN tool. *Materials Science and Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructures and Processing*, 488(1-2), 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.062>



مقاله‌ی کامل پژوهشی

تأثیر تعداد پاس بر ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت سطحی Ti/CNTs تولیدشده توسط فرایند همزنی اصطکاکی

مجتبی حکاک‌زاده^۱، حمیدرضا جعفریان^{۲*}، علیرضا ابوانی^۲، سید حسین سیدین^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده در این تحقیق، با افزودن نانولوله‌ی کربنی به زمینه‌ی تیتانیم خالص، نانوکامپوزیت سطحی توسط فرایند همزنی اصطکاکی ایجاد شد. در ابتدا، با آزمایش‌های گوناگون، سرعت خطی و چرخشی مطلوب به دست آمد (سرعت خطی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۳۰۰ دور بر دقیقه). سپس، با انجام تعداد پاس‌های متعدد فرایند بر روی تیتانیم خالص و همچنین بر روی کامپوزیت سطحی ایجادشده با درصد حجمی ثابت ۳/۸ درصد نانولوله‌ی کربن به بررسی تأثیر این متغیر بر خواص مکانیکی و ریزساختار تیتانیم خالص و کامپوزیت سطحی پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد بهترین استحکام و سختی برای کامپوزیت سطحی در پاس دوم فرایند حاصل شد، به‌گونه‌ای که استحکام نهایی و سختی بعد از دو پاس فرایند به ترتیب تا ۵۱۲ مگاپاسکال و ۲۶۵ ویکرز افزایش یافت. این در حالی است که استحکام نهایی و سختی تیتانیم خالص به ترتیب ۳۹۰ مگاپاسکال و ۴۵ ویکرز بود. نتایج نشان داد که فرایند همزنی اصطکاکی بر روی خواص مکانیکی تیتانیم خالص تأثیر محسوسی نداشته است.

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

کلیدواژه‌ها:

فرایند همزنی اصطکاکی،

نانولوله‌ی کربن،

دوقلویی،

خواص مکانیکی،

نانوکامپوزیت سطحی



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.486560.1311>

URL: https://www.jamt.ir/article_216721.html

۱- مقدمه

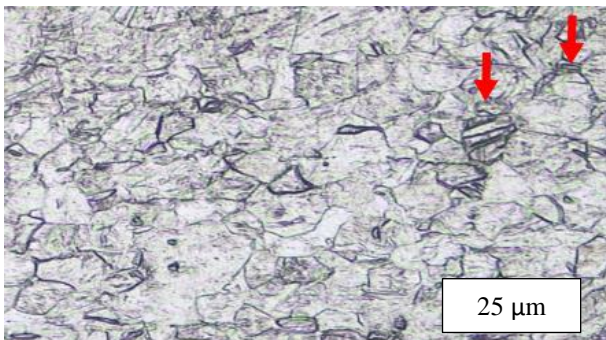
تحقیقات کارتیکیان و همکاران (Karthikeyan et al., 2009) نیز نشان داد که فرایند همزنی اصطکاکی موجب افزایش استحکام نهایی آلیاژ آلومینیم ۲۲۸۵ تا ۳۰ درصد می‌شود. همچنین، با افزایش سرعت چرخش نیز خواص استحکامی آلیاژ بهبود می‌یابد. محققان به تازگی از فرایند همزنی اصطکاکی در تولید کامپوزیت‌های سطحی استفاده کرده‌اند (Kwon et al., 2002). موريسادا و همکاران (Morisada et al., 2006) از فرایند همزنی اصطکاکی برای تولید کامپوزیت سطحی آلیاژ منیزیم-آلومینیم-روی^۵ با تقویت‌کننده‌ی نانولوله‌ی کربن استفاده کرده‌اند. آن‌ها

فرایند همزنی اصطکاکی^۱ که بر اساس جوشکاری همزنی اصطکاکی^۲ در ۱۹۹۱ ابداع شده است به تازگی به عنوان ابزاری برای اصلاح ریزساختار فلزات و آلیاژها استفاده شده است. (Mishra et al., 2005). اخیراً ما^۳ و همکاران (Ma et al., 2003) به بررسی تأثیر فرایند همزنی اصطکاکی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم-۷/۲۸ درصد سیلیسیم^۴ پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که فرایند همزنی اصطکاکی ریزساختار اولیه این آلیاژ را کاملاً تغییر می‌دهد و ذرات سوزنی شکل سیلیسیم و همچنین دندریت‌های اولیه‌ی آلومینیم را می‌شکند. از طرفی، این فرایند موجب توزیع همگن سیلیسیم در آلومینیم می‌شود.

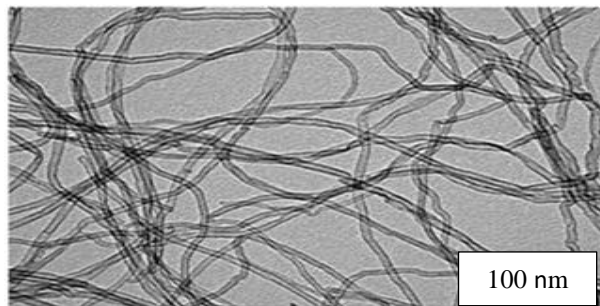
1. Friction stir processing
2. Friction stir welding
3. Ma
4. A356
5. AZ31

*عهده‌دار مکاتبات: حمیدرضا جعفریان

نانولوله‌های کربن چنددیواره^۱ را برخلاف میل شدید به خوشه‌ای شدن به خوبی در زمینه پخش کرده‌اند. خواص غیرهمسانگردی نانولوله‌های کربنی باعث می‌شود که حتی با افزودن کسر حجمی کمی از نانولوله‌های کربن خواص مطلوبی در کامپوزیت‌ها ایجاد شود (Liu et al., 2013). از طرفی، تحقیقات اخیر نشان داده است، برای غلظت‌های یکسان، هر چه اندازه‌ی ذرات تقویت‌کننده ریزتر باشد، کامپوزیت حاصله مستحکم‌تر و سخت‌تر است (Hosseini et al., 2015). این نتایج به مطالعات بعدی بر روی توسعه‌ی کامپوزیت‌سازی با ذرات نانو و میکرومتر منجر شده است. لیو و همکاران (Liu et al., 2014) به بررسی تأثیر تعداد پاس انجام فرایند بر روی نانولوله‌ی کربن در زمینه‌ی آلومینیم پرداخته‌اند. با توجه به نتایج آن‌ها، نانولوله‌های کربن با افزایش تعداد پاس فرایند همزنی اصطکاکی خرد می‌شوند و توزیع بهتری در ساختار پیدا می‌کنند. توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربن باعث بهبود خواص مکانیکی و ریزدانگی می‌شود. در این تحقیق سعی شده است تأثیر تعداد پاس بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی تیتانیم-۳/۸ درصد نانولوله‌ی کربنی ایجادشده توسط فرایند همزنی اصطکاکی بررسی شود.



شکل ۱. ریزساختار تیتانیم خالص تجاری



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانولوله‌های کربنی استفاده‌شده

در شکل ۳، تصویری از محفظه‌ی گاز آرگون بر روی قطعه‌ی کار نشان داده شده است.

در این تحقیق، از ابزاری از جنس کاربید تنگستن-۵ درصد کبالت با پینی استوانه‌ای شکل استفاده شده است. شایان ذکر است که به‌منظور بررسی اثر تعداد پاس بر خواص مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت سطحی ایجادشده، تعداد پاس‌های مختلف شامل ۱ تا ۳ پاس بر روی تیتانیم خالص و همچنین بر روی

نانولوله‌های کربن چنددیواره^۱ را برخلاف میل شدید به خوشه‌ای شدن به خوبی در زمینه پخش کرده‌اند. خواص غیرهمسانگردی نانولوله‌های کربنی باعث می‌شود که حتی با افزودن کسر حجمی کمی از نانولوله‌های کربن خواص مطلوبی در کامپوزیت‌ها ایجاد شود (Liu et al., 2013). از طرفی، تحقیقات اخیر نشان داده است، برای غلظت‌های یکسان، هر چه اندازه‌ی ذرات تقویت‌کننده ریزتر باشد، کامپوزیت حاصله مستحکم‌تر و سخت‌تر است (Hosseini et al., 2015). این نتایج به مطالعات بعدی بر روی توسعه‌ی کامپوزیت‌سازی با ذرات نانو و میکرومتر منجر شده است. لیو و همکاران (Liu et al., 2014) به بررسی تأثیر تعداد پاس انجام فرایند بر روی نانولوله‌ی کربن در زمینه‌ی آلومینیم پرداخته‌اند. با توجه به نتایج آن‌ها، نانولوله‌های کربن با افزایش تعداد پاس فرایند همزنی اصطکاکی خرد می‌شوند و توزیع بهتری در ساختار پیدا می‌کنند. توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربن باعث بهبود خواص مکانیکی و ریزدانگی می‌شود. در این تحقیق سعی شده است تأثیر تعداد پاس بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی تیتانیم-۳/۸ درصد نانولوله‌ی کربنی ایجادشده توسط فرایند همزنی اصطکاکی بررسی شود.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق نوردشده‌ی تیتانیم خالص تجاری^۲ گرید ۲ با ضخامت ۲ میلی‌متر و ابعاد ۳۰۰×۶۰ میلی‌متر استفاده شده است. با توجه به اینکه ورق تیتانیم خالص قبل از فرایند همزنی اصطکاکی تحت عملیات نورد گرم قرار گرفته بود، می‌توان گفت در ساختار تیتانیم خالص دوقلویی‌هایی در اندازه و ضخامت کم وجود دارد، به‌گونه‌ای که توسط میکروسکوپ نوری قابل مشاهده است. شکل ۱ تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار اولیه‌ی تیتانیم خالص را نشان می‌دهد (فلش‌های قرمز رنگ نشانه‌ی دوقلویی هستند). شایان ذکر است که اندازه‌ی دانه‌ی تیتانیم خالص قبل از انجام فرایند همزنی اصطکاکی ۲۰ میکرومتر است. برای افزودن نانولوله‌های کربن، شیاری با استفاده از فرز یک میلی‌متر به مقطع مستطیلی شکل و به ابعاد ۱×۵/۰ میلی‌متر در مرکز ورق و به موازات جهت نورد ایجاد شده است. نانولوله‌های کربن مورد استفاده در این پژوهش از نوع

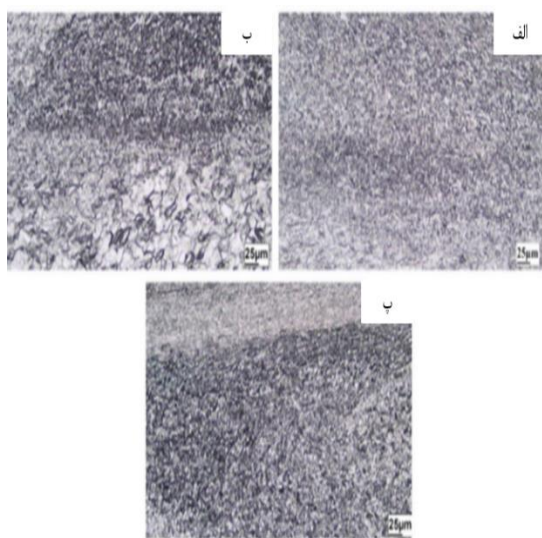
1. Multi-Wall Carbon Nanotubes
2. Ti(α)
3. Field emission scanning electron microscope

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

۳-۱-۱- نمونه‌های اصلاح ریزساختار (فاقد نانولوله‌های کربن)

در شکل ۵، تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های بدون نانولوله‌های کربن با تعداد پاس‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این تصاویر، طی فرایند همزنی اصطکاکی ساختار فلز پایه کاملاً از بین رفته است. همچنین، با توجه به تحقیقات قبلی، ناحیه‌ی همزنی با چگالی بالایی از نابیجایی‌ها و دوقلوبی‌ها در دانه‌های خردشده است (Lee et al., 2005).



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها بدون نانولوله‌ی کربن (سرعت خطی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۳۰۰ دور بر دقیقه): (الف) نمونه تحت یک پاس فرایند همزنی اصطکاکی قرار گرفته، (ب) نمونه تحت دو پاس فرایند همزنی اصطکاکی قرار گرفته و (پ) نمونه تحت سه پاس فرایند همزنی اصطکاکی قرار گرفته است.

در فرایند همزنی اصطکاکی تیتانیم، به دلیل انرژی نقص در چینش کم و همچنین ساختار هگزاگونال فشرده‌ی آن، ناحیه‌ی متأثر از فرایند ترمومکانیکی^۱ وجود ندارد. این ویژگی بسیار مفید است، زیرا به دلیل آثار حرارتی که معمولاً در سایر فرایندهای جوشکاری دیده می‌شود، امکان جوش‌های قوی و ثابت را بدون به خطر انداختن یکپارچگی مواد پایه فراهم می‌کند. به عبارتی، بین منطقه‌ی ناگت^۲ و متأثر از حرارت^۳، یک خط انتقال^۴ وجود

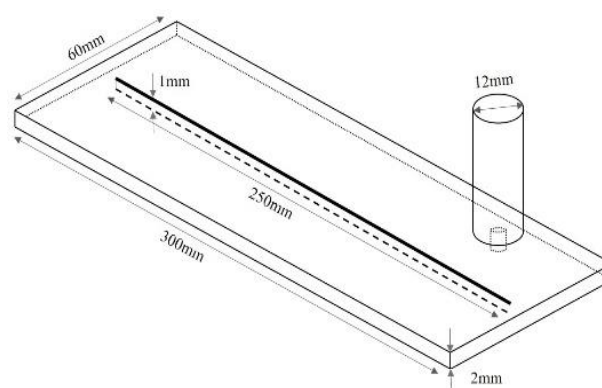
کامپوزیت سطحی ایجادشده با درصد حجمی ثابت ۳/۸ درصد نانولوله‌ی کربنی اعمال شد. قطر شانه ۱۲ میلی‌متر، ارتفاع بین یک میلی‌متر و قطر بین ۱/۳ میلی‌متر است. ریزساختار کامپوزیت سطحی ایجادشده و ریزساختار اصلاح‌شده بعد از انجام مراحل متالوگرافی با استفاده از ترکیب محلول‌های ۸۵ میلی‌لیتر آب، ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک و ۵ میلی‌لیتر هیدروفلئوریک اسید حکاکی شده است.

سپس، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی بررسی شدند. همچنین، خواص مکانیکی تیتانیم اصلاح‌شده و کامپوزیت سطحی ایجادشده با انجام آزمایش کشش و ریزسختی بررسی شد.

شکل ۴ طرح‌واره‌ای از فرایند همزنی اصطکاکی را با ابعاد دقیق ابزار و ورق تیتانیم نشان می‌دهد.



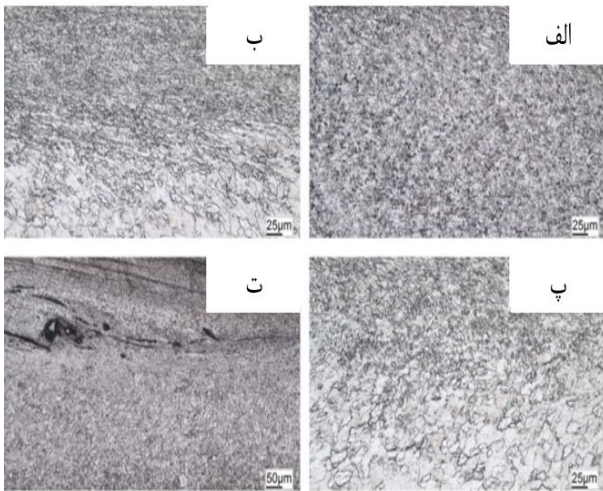
شکل ۳. نمای نزدیک قرار گرفتن محفظه‌ی گاز آرگون بر روی قطعه‌ی کار



شکل ۴. طرح‌واره‌ای از فرایند همزنی اصطکاکی

1. Thermomechanical affected zone (TMAZ)
2. Nugget zone (NZ)
3. Heat affected zone
4. Transition boundary

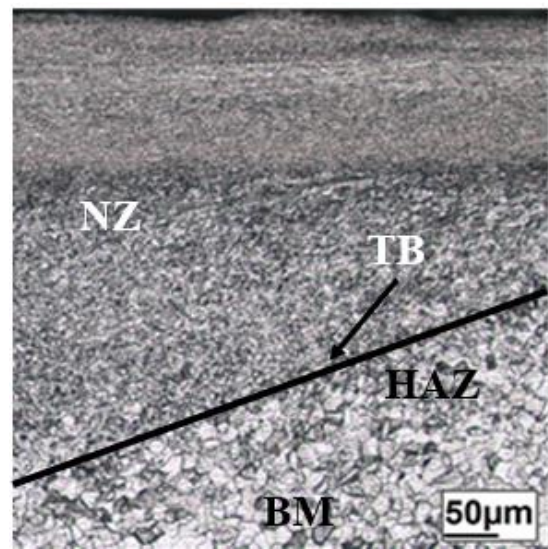
که چهار پاس فرایند همزنی اصطکاکی بر روی آن انجام شده است، به دلیل انجام کارسختی شدید و بیش از حد، ابزار با سرعت خطی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۳۰۰ دور بر دقیقه دیگر توان سیلان ماده را ندارد و در ناحیه‌ی پسر و عیب کانالی ایجاد می‌کند، البته ممکن است با سرعت خطی و چرخشی متفاوت ساختار همگن ایجاد شود. شایان ذکر است که مهم‌ترین ویژگی فلزات با ساختار هگزاگونال فشرده، که تحت تغییر فرم پلاستیک قرار گرفته‌اند، رشد سریع آرایه‌ای وسیع از دوقلوهای تغییر شکل بزرگ، پهن و عدسی‌شکل است.



شکل ۷. تصویر نوری کامپوزیت سطحی تیتانیوم-نانولوله‌ی کربنی (با سرعت خطی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۳۰۰ دور بر دقیقه): (الف) نمونه بعد از انجام یک پاس، (ب) نمونه بعد از انجام دو پاس، (پ) نمونه بعد از انجام سه پاس و (ت) نمونه بعد از انجام چهار پاس

با توجه به اینکه دمای فرایند حداقل به ۹۵۰ درجه‌ی سلسیوس می‌رسد و از دمای استحاله‌ی فازی آلفا به بتا بیشتر است (دمای استحاله‌ی فازی ۸۸۳ درجه‌ی سلسیوس) می‌توان نتیجه گرفت، در حین انجام فرایند همزنی اصطکاکی، دگرگونی فازی رخ می‌دهد. بعد از فرایند ذرات کروی فاز بتا در زمینه‌ی فاز سوزنی‌شکل آلفا تشکیل می‌شود که بیشترین چگالی این ذرات کروی درون نوارهای تیره است. فرارگیری این ذرات کروی به‌گونه‌ای با مدل جریان مواد حین فرایند همزنی اصطکاکی مطابقت دارد. شکل ۸ به‌وضوح این فازهای کروی را نشان می‌دهد. بعد از انجام فرایند طی سیکل سرد کردن به دلیل وجود گاز محافظ آرگون و جریان این گاز نرخ خنک‌کنندگی کمی بهتر از حالت معمولی بود. در نتیجه، تحول فازی زیر

دارد که این خط به‌وضوح در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در فلزاتی با ساختار هگزاگونال فشرده، که انرژی نقص در چینش کمی دارند (مانند تیتانیوم خالص)، دانه‌ها نمی‌توانند به‌خوبی رشد کنند و در عوض نابجایی‌ها به بخش‌ها و صفحات منظم، که نقص در چینش در آن‌ها رخ داده است، تقسیم می‌شوند (Zhang et al., 2008). ریزساختار منطقه‌ی ناگت در تیتانیوم دارای مقدار زیادی دوقلویی و دیواره‌ی نابجایی درهم‌فرورفته است. به عبارتی، تشکیل جنگلی از نابجایی در منطقه‌ی ناگت محتمل است و همچنین طی فرایند تغییر شکل پلاستیک لغزش نابجایی شدید اتفاق افتاده است (Salem et al., 2005).

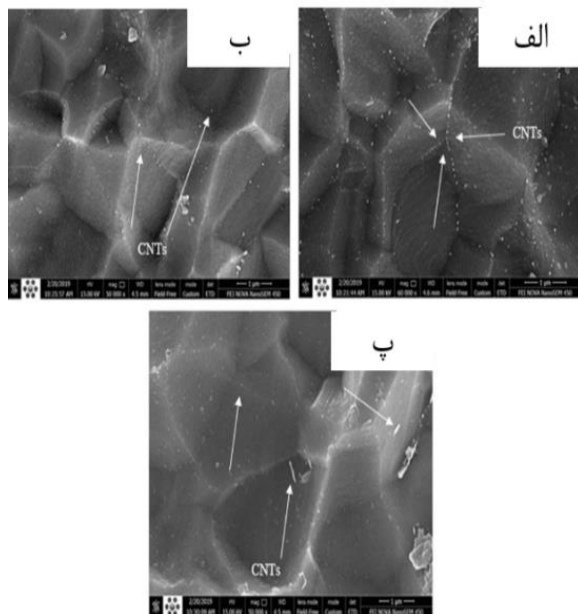


شکل ۶. تصویر نوری از نواحی گوناگون نمونه بدون نانولوله‌ی کربن بعد از انجام سومین پاس

۳-۱-۲- نانوکامپوزیت سطحی (حاوی نانولوله‌های کربن)

در شکل ۷، تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های کامپوزیت سطحی با تعداد پاس مختلف نشان داده شده است. در طی فرایند همزنی اصطکاکی، در پاس اول، منابع تولید نابجایی فعال می‌شوند و از طرفی وجود نانولوله‌های کربن باعث افزایش در تعداد این منابع می‌شود. نانولوله‌های کربن باعث ایجاد موانعی در مسیر حرکت نابجایی می‌شوند. با وجود موانع و منابع، به نظر می‌رسد که چگالی نابجایی در پاس دوم به‌شدت افزایش یافته، تا جایی که نابجایی‌ها به هم برخورد می‌کنند و لغزش متقاطع در صفحات لغزش رخ می‌دهد و این امر باعث می‌شود تغییر شکل با سازوکار تشکیل دوقلویی همراه شود. به عبارتی، احتمال می‌رود ساختار ناحیه‌ی همزنی در نمونه دو پاس دارای چگالی بالایی از دوقلویی و نابجایی باشد. گفتنی است که در نمونه‌ای

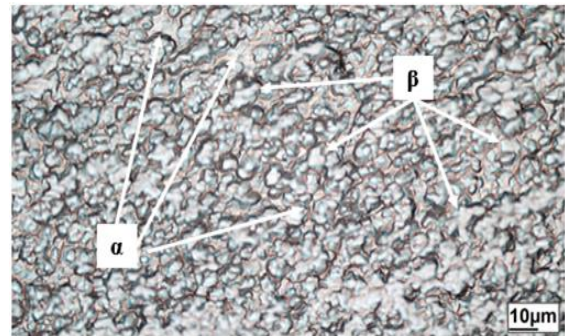
گیرد. در این فرایند، عیوبی در ساختار بلوری ایجاد می‌شود که برهم‌کنش آن‌ها با یکدیگر به افزایش استحکام و سختی ماده منجر می‌شود. به عبارت دیگر، سازوکار اصلی پدیده‌ی قفل‌کنندگی زرن تعامل بین نقص‌ها است. وقتی نابجایی‌ها در یک ماده ایجاد می‌شوند، می‌توانند توسط نابجایی‌های دیگر یا موانع درون شبکه‌ی بلوری متوقف شوند. این اثر قفل‌کنندگی می‌تواند حرکت بیشتر نقص‌ها را مهار کند و در نتیجه استحکام تسلیم ماده را افزایش دهد. بنابراین، افزایش عمر خستگی، افزایش مقاومت در برابر گسترش ترک‌ها و بهبود عملکرد مکانیکی کلی ماده‌ی تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای از جمله مهم‌ترین مزایای پدیده‌ی قفل‌کنندگی زرن است. همچنین، در تحقیقات قبلی گزارش شده است که علت تشکیل دانه‌های تبلور مجددیافته و هم‌محور در ناحیه‌ی همزده تیتانیم خالص تغییر شکل شدید است (Fujii et al., 2010). شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از نمونه‌های کامپوزیت سطحی با پاس‌های گوناگون را نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر، نانولوله‌های کربن در حین تبلور مجدد در مرزدانه‌ها تجمع می‌کنند و باعث توقف یا کند شدن رشد دانه‌ها می‌شوند. به همین دلیل، پس از انجام فرایند همزنی اصطکاکی، ساختار تبلور مجددیافته فوق ریزدانه است.



شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از نانوکامپوزیت‌های سطحی: (الف) نانوکامپوزیت سطحی بعد از انجام یک پاس، (ب) نانوکامپوزیت سطحی بعد از انجام دو پاس و (پ) نانوکامپوزیت سطحی بعد از انجام سه پاس

(معادله ۱) در حین فرایند سرد شدن اتفاق خواهد افتاد (Kumar et al., 2008).

$$\beta \rightarrow \beta + \alpha \quad (1)$$



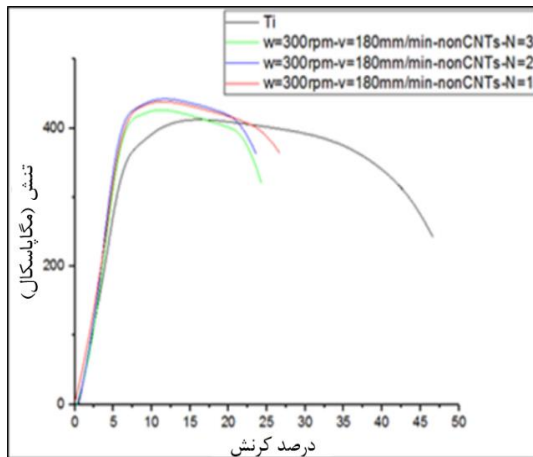
شکل ۸. تصویر ذرات کروی بتا در زمینه‌ی سوزنی‌شکل آلفا در نمونه‌ی کامپوزیت سطحی بعد از انجام سومین پاس

به‌منظور محاسبه‌ی عدد اندازه‌ی دانه از روی تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری در نمونه‌های فلز پایه (شکل ۱)، نمونه‌ی تحت فرایند همزنی اصطکاکی بدون نانولوله‌های کربن (شکل ۵-الف) و نمونه‌ی کامپوزیت سطحی تولیدشده در یک پاس با نانولوله‌ی کربن (شکل ۷-الف) از نرم‌افزار تحلیل تصویر ImageJ بهره‌گیری شد. شایان ذکر است که عدد اندازه‌ی دانه‌ی (d) معمولاً به‌صورت میانگین اندازه‌ی دانه‌ها بیان می‌شود. این عدد می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه شود (معادله ۲):

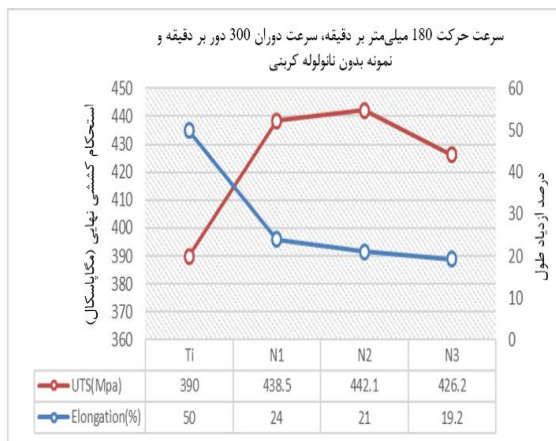
$$d = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \quad (2)$$

که در آن d_i اندازه‌ی هر دانه و n تعداد دانه‌ها است. نکته‌ی قابل توجه در محاسبه‌ی عدد اندازه‌ی دانه‌ی آن است که نمونه‌ی مورد بررسی باید نماینده‌ی از کل ماده باشد. با توجه به تصاویر ریزساختاری نمونه‌های کامپوزیت سطحی و نمونه‌های بدون افزودن نانولوله‌های کربنی، میانگین اندازه‌ی دانه در فلز پایه‌ی ۲۰ میکرومتر، نمونه‌ی تحت فرایند همزنی اصطکاکی بدون نانولوله‌های کربن ۴ میکرومتر و نمونه‌ی کامپوزیت سطحی تولیدشده در یک پاس با نانولوله‌ی کربن ۰/۴ میکرومتر است. دلیل کاهش این اندازه‌ی دانه در ناحیه‌ی همزنی نمونه‌ی کامپوزیت سطحی حضور نانولوله‌های کربن در مرزدانه‌ها است. به عبارتی، در حین تبلور مجدد حضور این نانولوله‌ها در مرزدانه‌ها باعث توقف یا کند شدن رشد دانه شده‌اند. به این اتفاق پدیده‌ی قفل‌کنندگی زرن^۱ گفته می‌شود، این ایده برای تنظیم مقدار رشد دانه مطرح شده است. پدیده‌ی قفل‌کنندگی زرن زمانی رخ می‌دهد که یک ماده تحت نرخ‌های بالای کرنش قرار

نابجایی‌ها با یکدیگر در ساختار تیتانیم خالص در طی فرایند نسبت داد.



شکل ۱۰. نمودار تنش-کرنش با سرعت خطی ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۳۰۰ دور بر دقیقه و همراه با تعداد پاس مختلف فرایند همزنی اصطکاکی



شکل ۱۱. تغییرات استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول بر حسب تعداد پاس‌های فرایند همزنی اصطکاکی

در طی تغییر شکل پلاستیک در پاس اول، سازوکارهای تولید نابجایی فعال می‌شوند. به عبارتی، تغییر شکل هم با سازوکار لغزش نابجایی‌ها و هم با سازوکار تشکیل دوقلوبی‌ها همراه است و همچنین در طی انجام تغییر شکل پلاستیک بیشتر (پاس دوم) سازوکار تشکیل دوقلوبی بیشتری رخ خواهد داد. باید توجه داشت در ساختار تیتانیم و فلزات با ساختار هگزاگونال فشرده، سازوکار تشکیل دوقلوبی به دلیل نبود سیستم لغزش کافی غالب است. از طرفی، به دلیل تبلور مجدد در ساختار و کاهش اندازه‌ی دانه و افزایش کسر حجمی مرزخانه‌ها، موانع حرکت نابجایی‌ها افزایش می‌یابد و موجب افزایش چگالی نابجایی‌ها و همچنین افزایش میزان دوقلوبی‌ها و در نتیجه افزایش

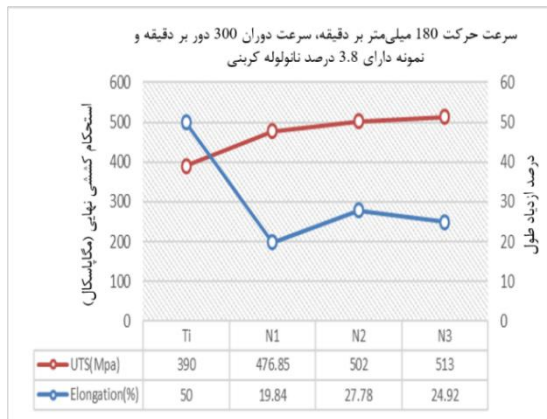
طبق نظریه‌ی ریوس (Rios et al., 2010) فصل مشترکی از ذرات تقویت‌کننده به صورت تصادفی یا اتفاقی در مرزخانه تجمع می‌کنند. این فصل مشترک شامل توزیع اتفاقی از ذرات ریز تقویت‌کننده با میزان درصد حجمی تقریباً کمی است. شایان ذکر است این نظریه با لایه‌ی سطحی نانوکامپوزیت ایجادشده تطابق مناسبی دارد. همان‌طور که از تصاویر موجود در شکل ۹ مشخص است، توزیع تصادفی نانولوله‌های کربن توسط ابزار شبیه‌الگوی ریوس است. با توجه به تصویر ۹-الف می‌توان گفت نانولوله‌های کربن در ساختار نمونه‌ی کامپوزیت سطحی تک‌پاسی به صورت خوشه‌ای است و اکثر این نانولوله‌های کربن در مرزخانه‌ها تجمع کرده‌اند. بعد از انجام فرایند در پاس دوم، خوشه‌های نانولوله‌های کربن در هم می‌شکنند و توزیع بهتری از نانولوله‌های کربن در ساختار به وجود می‌آید. به عبارتی، در حین تبلور مجدد، نانولوله‌های خردشده در درون دانه‌ها یکنواخت‌تر توزیع می‌شود. شایان ذکر است که لیو و همکاران به نتایج کاملاً مشابه دست یافته‌اند. به عبارتی، می‌توان گفت که هر چقدر تعداد پاس‌های فرایند افزایش یابد؛ اولاً، خوشه‌های نانولوله‌های کربن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابند و بیشتر نانولوله‌ها در زمینه‌ی تیتانیم پراکنده می‌شوند و به توزیع همگن‌تر نانولوله‌های کربن منجر می‌شوند و ثانیاً نانولوله‌ها بر اثر افزایش تعداد پاس فرایند همزنی اصطکاکی کوتاه‌تر می‌شوند و این به معنای آن است که غلظت بیشتر و اندازه‌ی کوچک‌تری از نانولوله‌ها به دست می‌آید.

۳-۲- خواص مکانیکی

۳-۲-۱- آزمون کشش

شکل ۱۰ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های طولی با تعداد پاس‌های مختلف فرایند همزنی اصطکاکی بدون افزودن نانولوله‌های کربن را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار می‌توان متوجه شد که افزایش تعداد پاس فرایند تأثیر چشمگیری بر افزایش استحکام نداشته است و تقریباً استحکام نمونه‌ی تک‌پاس و سه پاس مشابه است. همچنین، با توجه به شکل ۱۱ که نمودار تغییرات ازدیاد طول و استحکام نهایی را بر حسب تعداد پاس فرایند نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که با افزایش تعداد پاس فرایند همزنی اصطکاکی بدون افزودن نانولوله‌های کربن، استحکام نهایی تا حدی افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به تبلور مجدد، کاهش شدید اندازه‌ی دانه و از طرفی برخورد

در حین تبلور مجدد دینامیکی حضور نانولوله‌های کربن است. به عبارتی، نانولوله‌های کربن مانع رشد دانه می‌شوند. این امر موجب ایجاد ساختار فوق ریزدانه با استحکام بالا می‌شود.



شکل ۱۳. تغییرات ازدیاد طول و استحکام کششی نهایی بر حسب تعداد فرایند انجام شده برای نمونه‌های کامپوزیت سطحی

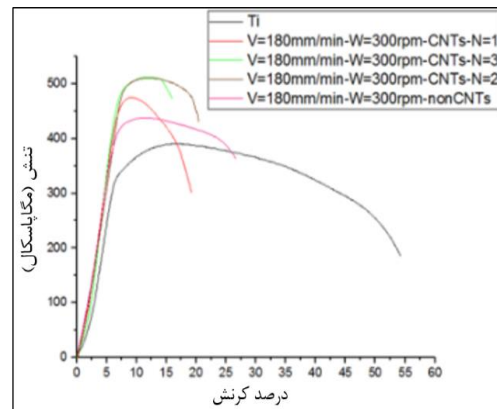
به منظور توصیف تغییرات در طول نانولوله‌های کربن، فرض می‌شود که شکست نانولوله‌ها به دلیل جریان زمینه‌ی اطراف آن‌ها یا تنش برشی تحمیل شده بر روی آن‌ها رخ می‌دهد. همچنین، احتمال می‌رود شکستگی نانولوله‌ها به حجم آن‌ها وابسته باشد. بکشی و همکاران (Bakshi et al., 2011) دریافتند که، اگر نانولوله‌های کربن به‌طور مساوی و یکنواخت پراکنده شوند، سازوکار انتقال بار موجب افزایش استحکام می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق و تحقیقات مشابه می‌توان گفت بازده انتقال بار ضعیف و تمرکز تنش ناشی از خوشه‌های نانولوله‌ها سبب کاهش استحکام کامپوزیت سطحی تیتانیوم-نانولوله‌ی کربنی شده است. به‌طورکلی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد پاس‌های فرایند به بیش از دو پاس، ابعاد نانولوله‌های کربن کوتاه‌تر می‌شود و تأثیرگذاری آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. حضور ذرات تقویت‌کننده در ساختار باعث فعال شدن سازوکارهای تولید نابجایی مانند سازوکار فرانک-رید^۲ می‌شود (Arora et al., 2012).

فعال شدن منابع تولید نابجایی موجب افزایش چگالی نابجایی‌ها می‌شود. از طرفی، ذرات تقویت‌کننده مانع حرکت نابجایی‌ها می‌شوند و در نتیجه باعث افزایش استحکام کامپوزیت سطحی می‌شوند. همچنین، این امر باعث افزایش تراکم نابجایی و لغزش متقاطع در صفحات لغزش می‌شود. از طرفی، به دلیل

کارسختی می‌شود که این امر باعث کاهش شدید میزان ازدیاد طول یا انعطاف‌پذیری شده است (شکل ۱۱).

با افزایش تعداد پاس فرایند، میزان استحکام نهایی تا پاس دوم (۴۴۲/۱ مگاپاسکال) به میزان کمی افزایش می‌یابد و در پاس سوم (۴۲۶/۲ مگاپاسکال) کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که کاهش استحکام در سومین پاس فرایند به تغییر بافت، که به سازوکار نرم شدن بافت^۱ معروف است، مربوط می‌شود (Kalidindi et al., 2003).

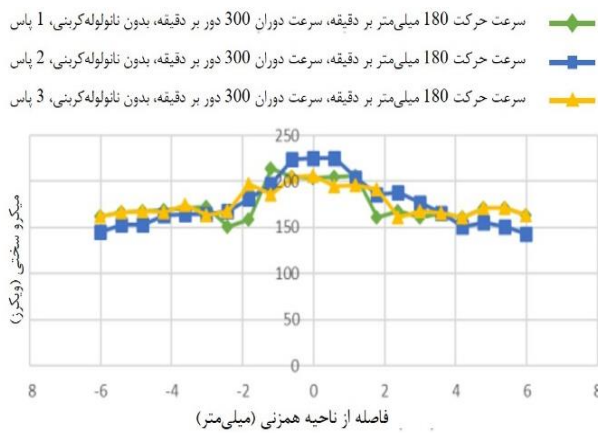
در شکل ۱۲، نمودار تنش-کرنش کامپوزیت سطحی تیتانیوم با تقویت‌کننده‌ی نانولوله‌ی کربن با تعداد پاس‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نمودار تنش-کرنش کامپوزیت سطحی با تعداد پاس‌های مختلف فرایند همزنی اصطکاکی

شایان ذکر است که افزایش شدید استحکام تیتانیوم از ۳۹۰ و ۵۱۳ مگاپاسکال در حالت سه پاس نشان‌دهنده‌ی توزیع عالی و یکنواخت نانولوله‌های کربن در ساختار و همچنین ایجاد ساختار فوق ریزدانه است. به عبارتی، علت به دست آمدن حداکثر استحکام نهایی با استفاده از سه پاس فرایند حذف خوشه‌بندی نانولوله‌های کربن و توزیع یکنواخت آن‌ها است. با توجه به شکل ۱۳، استحکام نهایی تیتانیوم خالص از ۳۹۰ مگاپاسکال، پس از انجام پاس اول، تقریباً به ۴۸۰ مگاپاسکال رسیده است و در پاس دوم و سوم که بهترین نمونه از لحاظ خواص مکانیکی است، استحکام نهایی آن‌ها به ترتیب ۵۰۲ و ۵۱۳ مگاپاسکال است. به عبارتی، علت به دست آمدن حداکثر استحکام نهایی با استفاده از سه پاس فرایند حذف خوشه‌بندی نانولوله‌های کربن و توزیع یکنواخت آن‌ها است. علت ایجاد ساختار فوق ریزدانه

می شود. این نتیجه شواهد مستقیم و روشنی را برای سخت شدن ماده به وسیله ی دوقلویی حاصل از تغییر شکل ارائه می دهد که ناشی از کاهش طول لغزش مؤثر (اثر هال-پیچ) و افزایش سختی ناحیه ی دوقلویی (سازوکار باسینسکی) است. سازوکار باسینسکی به عنوان جایگزینی برای مدل هال-پیچ در سخت شدن به وسیله ی دوقلویی پیشنهاد می شود که نابعی های قابل لغزش قبل از دوقلویی به آرایش زیرساختاری ساکن تبدیل می شوند که نتیجه ی تغییر شکل برشی دوقلویی است. بنابراین، نواحی دوقلویی باید سخت تر از نواحی غیر دوقلویی باشند و این امر به سخت شدن کلی ماده منجر می شود. شکل ۱۴ نمودار ریزسختی نواحی مختلف نمونه ها بدون نانولوله های کربن با تعداد پاس های مختلف فرایند را نشان می دهد (Lee et al., 2005).



شکل ۱۴. نمودار ریزسختی نمونه های فاقد نانولوله های کربن با تعداد پاس های مختلف فرایند همزنی اصطکاکی

شکل ۱۵ نمودار ریزسختی کامپوزیت های سطحی با تعداد پاس های مختلف طی فرایند همزنی اصطکاکی را نشان می دهد. پس از انجام یک پاس فرایند همزنی اصطکاکی، به دلیل عدم توزیع یکنواخت نانولوله های کربن و همچنین تشکیل خوشه های نانولوله های کربنی، ریزسختی در مقایسه با حالت یک پاس فرایند فاقد نانولوله های کربن کاهش می یابد. سپس، با انجام دوباره ی فرایند، سازوکار ایجاد سختی فعال و همچنین توزیع نانولوله های کربن یکنواخت تر می شود. توزیع یکنواخت نانولوله های کربن باعث می شود، سختی در قسمت های پیشرو و پسرو دارای نرخ یکنسان و متقارن باشد. همان طور که در شکل ۱۵ مشخص است، بیشترین سختی در ناحیه ی ناگت و

کاهش سیستم لغزش، سازوکار لغزش متوقف می شود و در نتیجه تغییر شکل بعد از آن با سازوکار تشکیل دوقلویی ادامه می یابد. افزایش کسر حجمی دوقلویی ها می تواند سبب افزایش شدید سازوکار دوقلویی-دوقلویی و دوقلویی-لغزشی می شود و از طرفی باعث افزایش دشواری در تولید دوقلویی های جدید در زمینه طی کرنش های زیاد شود. به منظور مقایسه بهتر تغییرات از یاد طول و استحکام کششی نهایی در نمونه های فاقد و دارای نانولوله های کربنی تحت فرایند همزنی اصطکاکی (داده های موجود در شکل های ۱۱ و ۱۳)، جدول ۱ به شرح ذیل ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه ی تغییرات ازدیاد طول و استحکام کششی نهایی در نمونه ی اولیه و نمونه های فاقد و دارای نانولوله های کربنی تحت

فرایند همزنی اصطکاکی

نوع نمونه	شرایط و نتایج	تعداد پاس ها	استحکام کششی نهایی (MPa)	تغییرات ازدیاد طول (%)
تیتانیوم خالص		-	۳۹۰	۵۰
نمونه های فاقد نانولوله های کربنی		۱	۴۳۸/۵	۲۴
		۲	۴۴۲/۱	۲۱
		۳	۴۶۶/۲	۱۹/۲
نمونه های دارای ۳/۸ درصد نانولوله های کربنی		۱	۴۶۸/۵	۱۹/۸۴
		۲	۵۰۲	۲۷/۷۸
		۳	۵۱۳	۲۴/۹۲

۳-۲-۲- ریزسختی

در نمونه های تیتانیوم با نانولوله ی کربن و بدون نانولوله بیشترین میزان سختی در هر نمونه مربوط به ناحیه ی ناگت است. دلیل این امر را می توان به وجود چگالی بالایی از نابعی های دوقلویی ها در این ناحیه نسبت داد. با توجه به نتایج به دست آمده و مطالعه ی تحقیقات مشابه در طی فرایند پاس اول، سازوکار سختی هال-پیچ^۱ است. به عبارت دیگر، در این سازوکار، با وجود تعداد کمی سیستم لغزش و همچنین ایجاد موانع در برابر حرکت نابعی های، لغزش آزاد نابعی های در مقایسه با تراکم نابعی های افزایش می یابد. در پاس دوم، به دلیل افزایش تراکم نابعی های و برخورد نابعی های و همچنین لغزش متقاطع در صفحات لغزش، سازوکار معرفی شده ی باسینسکی^۲ جایگزین سازوکار هال-پیچ می شود. به عبارتی، طی سازوکار معرفی شده ی باسینسکی نابعی لغزشی^۳ به نابعی نفوذی^۴ در درون دوقلویی تبدیل

1. Hall-Petch
2. Basinski
3. Glissile
4. Sessile

می‌یابد. شایان ذکر است که در پاس سوم ریزسختی ناحیه‌ی همزنی کاهش می‌یابد.

۵- با افزایش تعداد پاس‌های فرایند بر روی کامپوزیت سطحی، خوشه‌های نانولوله‌های کربن تخریب می‌شوند. همین امر باعث انتقال بهتر بار از زمینه به نانولوله‌های کربن می‌شود. به همین دلیل، استحکام نهایی کامپوزیت سطحی در یک پاس فرایند از ۴۴۷ به ۵۱۲ مگاپاسکال در سه پاس افزایش می‌یابد.

۶- ریزسختی کامپوزیت سطحی در ناحیه‌ی همزنی با افزایش تعداد پاس‌های فرایند تا دو پاس افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که ریزسختی در ناحیه‌ی همزنی نمونه‌ی یک پاس ۱۸۷ ویکرز و نمونه‌ی دو پاس ۲۷۴ ویکرز است. شایان ذکر است که با توجه به تغییر جهت بافت در پاس سوم فرایند، ریزسختی ناحیه‌ی همزنی در این ناحیه تا ۲۴۰ ویکرز کاهش یافته است.

در پایان پیشنهاد می‌شود که با وارد کردن داده‌های اولیه‌ی این آزمایش در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز نظیر Deform، نتایج حاصل از این پژوهش صحت‌سنجی شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود که به‌منظور توسعه‌ی داده‌های حاصل از این پژوهش، سایر پژوهشگران تحقیقات دیگری پیرامون بررسی اثر متغیرهای فرایند همزنی اصطکاکی نظیر سرعت خطی، سرعت چرخشی و تعداد پاس بر خواص مکانیکی و ریزساختاری نانوکامپوزیت‌های سطحی زمینه‌ی تیتانیومی انجام دهند.

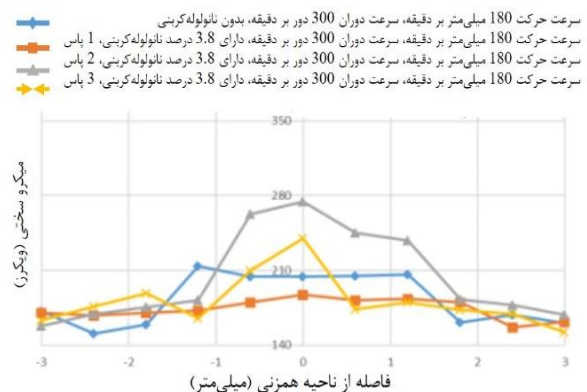
۵- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و سپاسگزاری خود را از مجموعه‌ی دانشگاه علم و صنعت ایران به پاس حمایت‌های بی‌دریغ از پژوهش حاضر اعلام می‌دارد.

مراجع

- Arora, H. S., Singh, H., & Dhindaw, B. K. (2012). Composite fabrication using friction stir processing—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(9-12), 1043–55. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3758-8>
- Bakshi, S. R., & Agarwal, A. (2011). An analysis of the factors affecting strengthening in carbon nanotube reinforced aluminum composites. *Carbon*, 49(2), 533–544. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.09.054>
- Fujii, H., Sun, Y., Kato, H., & Nakata, K. (2010). Investigation of welding parameter dependent microstructure and mechanical properties in friction stir welded pure Ti joints. *Acta Materialia*, 527(15), 3386–3391. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.02.023>
- Hosseini, S., Ranjbar, K., Dehmolaie, R., & Amirani, A. (2015). Fabrication of Al5083 surface composites reinforced by CNTs and cerium oxide nano particles via friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 622, 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.158>

بهترین توزیع سختی در قسمت پسرو و پیشرو مربوط به نمونه‌ی دو پاسی است. با توجه به شکل ۱۴ و ۱۵، بعد از انجام سومین پاس فرایند همزنی اصطکاکی، ریزسختی ناحیه‌ی ناگت کاهش می‌یابد و دلیل آن سازوکار نرم شدن بافت است. به عبارتی، در طی این سازوکار جهت بافت تغییر می‌کند و همراه با تشکیل دوقلویی جدید صفحات لغزش جدیدی کنار دوقلویی‌ها ایجاد می‌شوند. به عبارتی، تنش لازم برای اعمال لغزش کمتر می‌شود و لغزش راحت‌تر رخ می‌دهد. از طرفی، نیروی محرکه برای تشکیل دوقلویی‌های جدید در زمینه، در تنش‌های بیشتر، کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵. نمودار ریزسختی نمونه‌های کامپوزیت سطحی با تعداد پاس‌های متفاوت طی فرایند همزنی اصطکاکی

۴- نتیجه‌گیری

بر مبنای پژوهش انجام‌شده، موارد ذیل را می‌توان مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش فوق برشمرد:

۱- افزایش تعداد پاس‌های فرایند باعث خرد شدن و توزیع منظم و یکنواخت‌تر نانولوله‌های کربن در کامپوزیت سطحی می‌شود.

۲- انجام یک پاس فرایند همزنی اصطکاکی بر روی تیتانیوم خالص بدون افزودن نانولوله‌های کربن باعث افزایش استحکام نهایی تیتانیوم از ۳۹۰ تا ۴۳۵ مگاپاسکال می‌شود.

۳- انجام بیش از یک پاس فرایند همزنی اصطکاکی بر روی تیتانیوم خالص تأثیر محسوسی بر استحکام نهایی تیتانیوم نداشته است. به‌گونه‌ای که استحکام نهایی تیتانیوم خالص بعد از یک پاس فرایند ۴۳۸ مگاپاسکال و بعد از دو پاس فرایند ۴۴۲ مگاپاسکال است.

۴- ریزسختی تیتانیوم خالص با افزایش تعداد پاس‌های فرایند همزنی اصطکاکی تا دو پاس از ۱۴۵ تا ۲۲۵ ویکرز افزایش

5. Kalidindi, S. R., Salem, A. A., & Doherty, R. D. (2003). Role of Deformation Twinning on Strain Hardening in Cubic and Hexagonal Polycrystalline Metals. *Advanced Engineering Materials*, 5(4), 229–232. <https://doi.org/10.1002/adem.200300320>
6. Karthikeyan, L., Senthilkumar, V. S., Balasubramanian, V., & Natarajan, S. (2009). Mechanical property and microstructural changes during friction stir processing of cast aluminum 2285 alloy. *Materials & Design*, 30(6), 2237–2242. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.006>
7. Kumar, K. S., & Kailas, S. V. (2008). The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Acta Materialia*, 485(1-2), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.013>
8. Kwon, Y. J., Saito, N., & Shigematsu, I. (2002). Friction stir process as a new manufacturing technique of ultrafine grained aluminum alloy. *Journal of Materials Science Letters*, 21(19), 1473–1476. <https://doi.org/10.1023/a:1020067609451>
9. Lee, W., Lee, C. Y., Chang, W. S., Yeon, Y. M., & Jung, S. (2005). Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium. *Materials Letters*, 59(26), 3315–3318. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.05.064>
10. Liu, Q., Ke, L., Liu, F., Huang, C., & Xing, L. (2013). Microstructure and mechanical property of multi-walled carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing. *Materials & Design*, 45, 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.036>
11. Liu, Z. Y., Xiao, B. L., Wang, W. G., & Ma, Z. Y. (2014). Analysis of carbon nanotube shortening and composite strengthening in carbon nanotube/aluminum composites fabricated by multi-pass friction stir processing. *Carbon*, 69, 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.12.025>
12. Ma, Z. Y., Sharma, S. R., Mishra, R. S., & Mahoney, M. W. (2003). Microstructural Modification of Cast Aluminum Alloys via Friction Stir Processing. In *Materials Science Forum* (Vol. 426, No. 4, pp. 2891–2896). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.426-432-2891>
13. Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1-2), 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
14. Morisada, Y., Fujii, H., Nagaoka, T., & Fukusumi, M. (2006). MWCNTs/AZ31 surface composites fabricated by friction stir processing. *Materials & Design*, 419(1-2), 344–348. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.016>
15. Rios, P. R., & da Fonseca, G. S. (2010). Grain Boundary Pinning by Particles. *Materials Science Forum* (Vol. 638, pp. 3907–3912). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.638-642.3907>
16. Salem, A. A., Kalidindi, S. R., & Semiatin, S. L. (2005). Strain hardening due to deformation twinning in α -titanium: Constitutive relations and crystal-plasticity modeling. *Acta Materialia*, 53(12), 3495–3502. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.04.014>
17. Zhang, Y., Sato, Y. S., Hiroyuki Kokawa, Seung, & Hirano, S. (2008). Stir zone microstructure of commercial purity titanium friction stir welded using pcBN tool. *Materials Science and Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructures and Processing*, 488(1-2), 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.062>