



## بررسی تأثیر عملیات حرارتی آنیل بین پاسی و روانکار بر رفتار کشش سرد سوپر آلیاژ اینکونل X750 در فرایند مفتول کشی سرد

علیرضا میرک<sup>۱\*</sup>، امیرسالار دهقانی<sup>۲</sup>

۱- مجتمع دانشگاهی مهندسی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مواد، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: mirak@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۹ اسفند ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۲ مرداد ۱۴۰۴

### کلیدواژگان:

سوپر آلیاژ اینکونل X750

نورد شیبی داغ

مفتول کشی سرد

MoS2

در تحقیق حاضر، تأثیر دما و زمان آنیل در محدوده‌ی دمایی ۹۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های ۱ تا ۴ ساعت، بر ریزساختار و خواص مکانیکی مفتول تولید شده از جنس سوپر آلیاژ اینکونل X750 به روش کشش سرد توسط مطالعات ریزساختاری، بررسی‌های خواص مکانیکی و زبری سنجی بررسی شده است. شمش اولیه توسط روش ذوب با قوس الکتریکی در خلأ ریخته‌گری شد، سپس قطر شمش از ۲۵ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر توسط نورد شیبی داغ کاهش یافت. برای افزایش شکل‌پذیری، مفتول‌ها آنیل شدند. آنیل باعث کاهش استحکام کششی از ۱۶۰۰ به ۸۰۰ مگاپاسکال و افزایش ازدیاد طول از ۶ درصد به ۷۰ درصد شد. با افزایش زمان آنیل اندازه دانه و ازدیاد طول افزایش و استحکام کاهش یافت. در فرایند مفتول کشی، مفتول اولیه در ۶ مرحله آنیل و ۱۱ پاس کشش سرد به قطر ۱ میلی‌متر رسید. بهترین شرایط زمانی برای آنیل از بین زمان‌های ۱ تا ۴ ساعت، زمان ۴ ساعت به دست آمد. بررسی‌های ریزساختاری، نشان داد که فرایند آنیل بین پاسی، باعث تبلور مجدد و بازیابی ساختار می‌شود و توان کار سختی افزایش یافته و پاس‌های بعدی مفتول کشی قابل انجام است. همچنین استفاده از روانکار حاوی MoS2، به علت کاهش اصطکاک باعث افزایش توانایی تغییر شکل سرد مفتول شد و تعداد مراحل آنیل را از ۶ مرحله آنیل به ۳ مرحله کاهش و استحکام کششی را از ۹۰۰ به ۱۳۰۰ مگاپاسکال افزایش داد و زبری سطح از ۸/۳ به ۲/۶ میکرومتر کاهش یافت.

## Investigation of the effect of inter-pass annealing heat treatment and lubricant on the cold drawing behavior of Inconel X750 superalloy during cold wire drawing process

Alireza Mirak<sup>1\*</sup>, Amirshalar Dehghani<sup>2</sup>

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: mirak@iust.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 9 March 2025

Accepted: 13 August 2025

#### Keywords:

Inconel X750 Superalloy

Hot Caliber Rolling

Cold Wire Drawing

MoS2

### Abstract

In the present study, the effects of annealing temperature and time—within the temperature range of 950 to 1100 °C and durations from 1 to 4 hours—on the microstructure and mechanical properties of wire made from Inconel X-750 superalloy, produced by cold drawing, were investigated through microstructural analysis, mechanical testing, and surface roughness measurements. The initial ingot was cast using vacuum arc remelting, and its diameter was reduced from 25 mm to 2 mm through hot groove rolling. To enhance ductility, the wires underwent annealing. Annealing reduced the tensile strength from 1600 to 800 MPa and increased elongation from 6% to 70%. As annealing time increased, grain size and elongation increased, while tensile strength decreased. During the wire drawing process, the initial wire underwent six stages of annealing and eleven passes of cold drawing to reach a final diameter of 1 mm. Among the tested durations, the optimal annealing time was 4 hours. Microstructural examinations revealed that interpass annealing led to recrystallization and structural recovery, enhancing workability and allowing further drawing passes. Additionally, the use of a lubricant containing molybdenum disulfide reduced friction, thereby improving the cold formability of the wire, reducing the number of required annealing steps from six to three, increasing tensile strength from 900 MPa to 1300 MPa, and decreasing surface roughness from 3.8 to 2.6 μm.

### Please cite this article using:

Mirak A, Dehghani A. Investigation of the effect of inter-pass annealing heat treatment and lubricant on the cold drawing behavior of Inconel X750 superalloy during cold wire drawing process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Aug 23;12(6):1-18. doi: 10.22034/ijme.2025.509853.2058 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

سوپر آلیاژ اینکونل X750 یک آلیاژ پایه نیکل-کروم است که با تشکیل رسوب‌های بین فلزی حین فرایند پیرسازی، سخت می‌شود. این آلیاژ علاوه بر این که تا دمای  $700^{\circ}\text{C}$ ، استحکام خود را حفظ می‌کند، خواص دمای پایین مناسبی نیز دارد [۱] و همچنین دارای مقاومت بالایی در برابر اکسیداسیون تا حدود دمای  $700^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد و مقاومت به خوردگی آن نیز بالاست. اینکونل X750 در کاربردهایی مانند توربین‌های گازی [۲]، محفظه‌های رانش موتور موشک [۳]، کاربردهای راکتور هسته‌ای [۴-۷] و همچنین پیچ و مهره، پین، فنر و بست‌هایی که در دمایی تا حدود  $700^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند [۸، ۹]، استفاده می‌شود. گزارش شده که استحکام کششی اینکونل X750 بعد از عملیات کار گرم یا کار سرد، با اعمال فرایند پیرسازی به میزان  $400$  مگاپاسکال افزایش یافته است [۱۰]. این آلیاژ عموماً در حالت پیرسازی شده استفاده می‌شود و زمینه شامل محلول جامد  $\gamma$  و رسوبات بین فلزی هم‌سیما  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ )، به همراه کاربیدهای اولیه‌ای از نوع MC و کاربیدهای ثانویه  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  می‌باشد [۱۱، ۱۲]. رسوب‌های MC به‌صورت کروی هستند و تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی آلیاژ ندارند و رسوب‌ها از نوع  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  عموماً در مرز دانه‌ها تشکیل می‌شوند و خواص خزشی آلیاژ را بهبود می‌دهند [۱۳]. همچنین در دمای کاری، امکان تشکیل مقدار کمی فاز مضر  $\eta$  وجود دارد.

مفتول اینکونل X750، به‌عنوان محصولی برای تولید الکتروود فرایند ساخت افزایشی، الکتروود جوش کاری و فنرهای دما بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. دو روش معمول برای تولید مفتول‌های اینکونل X750 استفاده می‌شود. روش مفتول‌کشی سرد و روش‌های شکل‌دهی داغ که شامل نورد داغ میله و مفتول‌کشی داغ می‌باشد [۱۴]. محقق‌ها برخی از پارامترهای هر دو روش کار سرد و کار گرم را بررسی کرده‌اند که برخی از آن‌ها در ذیل ارائه شده است.

در تحقیقی که توسط ها و همکاران [۱۴] انجام گردیده، تأثیر میزان کاهش سطح مقطع توسط فرایند مفتول‌کشی بر رسوب فاز  $\gamma'$  بررسی شده است. در این تحقیق فرایند آئیل بعد از مرحله‌ی اول کشش، در  $1100^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد در یک اتمسفر احیایی انجام گردید. بعد از اتمام فرایند کشش سرد، فرایند پیرسازی در محدوده‌ی دمایی  $620^{\circ}\text{C}$  و  $732^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت  $16$  ساعت انجام شد و تغییرات فاز  $\gamma'$  و رسوب‌های کاربیدی بررسی گردید. با افزایش میزان کار سرد، بعد از فرایند پیرسازی، ساختار ریزدانه‌تری ایجاد می‌شود و دلیل این امر تشویق تبلور مجدد با افزایش میزان کار سرد است.

در تحقیق دیگری که توسط دسوزا و همکاران انجام شده است [۱۵]، تأثیر کار سرد از  $0^{\circ}\text{C}$  تا  $30^{\circ}\text{C}$  درصد و فرایند پیرسازی بر رفتار مکانیکی مفتول اینکونل X750 بررسی شده است. فرایند پیرسازی در دمای  $781^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و به مدت  $16$  ساعت انجام گردیده است. نتایج آزمون‌ها نشان داد که تنش تسلیم با میزان کار سرد تناسب دارد ولی میزان تغییرات تنش تسلیم بعد از فرایند پیرسازی، قابل چشم‌پوشی است. بازیابی دینامیکی تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی سوپر آلیاژ داشته است و باعث کاهش تأثیر استحکام دهی ناشی از رسوب سختی فاز  $\gamma'$  شده است. به علت بازیابی برای مقادیر کار سرد بیشتر از  $20^{\circ}\text{C}$  درصد، میزان شکل‌پذیری بهبود یافته است [۱۴].

مطالعه‌های دیگری نیز روی رفتار کار گرم سوپر آلیاژ اینکونل X750 انجام شده است [۱۶-۱۹] در تحقیقی که توسط محمودی و همکاران [۱۹]، انجام شده، ریزساختار و نقشه‌های فرایند تغییر شکل داغ<sup>۲</sup> نمونه‌های اینکونل X750 مطالعه شده است. در این تحقیق توسط آزمون فشار داغ در محدوده دمایی  $950^{\circ}\text{C}$  تا  $1150^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های کرنش  $1 \times 10^{-1}$  -  $1 \times 10^{-2}$ ، مطالعات شکل‌پذیری داغ این آلیاژ انجام گرفته است. در نواحی تغییر شکل داغ، ریزساختار با تبلور مجدد دینامیکی همراه است و همین امر باعث می‌شود تا نمونه در این ناحیه، بدون تشکیل ترک یا پارگی، تغییر شکل یابد. دمای پیشنهادی برای انجام فرایند تغییر شکل داغ، محدوده‌ی دمای  $1080^{\circ}\text{C}$  تا  $1140^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های کرنش،  $1 \times 10^{-1}$  تا  $1 \times 10^{-2}$  می‌باشد [۱۹].

بالینگر و همکاران [۲۰]، تأثیر زمان عملیات همگن سازی را بر پایداری رسوبات در آلیاژ اینکونل X750 بررسی کرده‌اند. دمای همگن سازی  $1100^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت  $1$  ساعت، باعث انحلال فازهای گاما پرایم و رسوبات  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  نشده و هیچ تأثیری روی درصد فاز MC نداشته است. افزایش زمان عملیات حرارتی تا  $2$  ساعت، باعث انحلال درصد بالایی از گاما پرایم و  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  شده است. آریا و همکاران [۲۱]، مفتول‌کشی مرحله به مرحله نیکل خالص را از قطر  $1/73$  میلی‌متر تا  $30$  میکرومتر، مورد بررسی قرار داده‌اند. با پیش رفت فرایند مفتول‌کشی، چگالی نابجایی‌ها در مقدار  $2 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$  تثبیت شد و با افزایش بیشتر کاهش سطح مقطع،

1 Coherent

2 Processing Map

شکل پذیری کاهش و استحکام افزایش یافت به گونه‌ای که خواص مکانیکی مفتول نهایی شامل استحکام کششی ۱۲۵۰ مگاپاسکال با ازدیاد طول ۲ درصد حاصل شد. جهت‌گیری دانه‌ها در مرکز مفتول در جهت کریستالی <۱۱۱> بوده است، ولی در لبه‌های مفتول، به علت تغییر شکل پلاستیک شدید، جهت‌گیری دانه‌ها در جهات مختلف بوده و بافت تشکیل شده از نوع پیچیده شناسایی گردید. با افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک و کاهش سطح مقطع، به علت کاهش اندازه دانه، استحکام افزایش یافت.

از تحقیق‌های دیگری که روی این آلیاژ انجام شده است، تأثیر روانکار بر رفتار سایشی این سوپر آلیاژ است. کومارو همکاران [۲۲]، تأثیر روانکار MoS<sub>2</sub> بر رفتار سایشی سوپر آلیاژ اینکونل X750 و فولاد EN8 را بررسی کرده‌اند. در حالت بدون روانکار، لایه‌ی اکسیدی در هر دو سطح فولاد و اینکونل X750 تشکیل می‌شود. افزودن روانکار حاوی MoS<sub>2</sub>، با ایجاد لایه‌ی مرزی، سایش بین سطوح را به شدت کاهش داده است. ضریب سایش<sup>۱</sup> پین اینکونل X750 برای روانکار حاوی MoS<sub>2</sub>، کمترین مقدار بوده است و با افزایش سرعت فرایند سایش نیز، مقدار ضریب سایش، ثابت باقی‌مانده است این در حالی است که برای حالت بدون روانکار، ضریب سایش در بازه‌ی سرعت سایش ۰/۴۵-۰ متر بر ثانیه، در حدود ۰/۰۰۵ mm<sup>3</sup>/Nm بوده است که این مقادیر برای حالت روانکار MoS<sub>2</sub>، مقدار ۰/۰۰۱ mm<sup>3</sup>/Nm بوده است. لازم به ذکر است مقدار ضریب سایش برای حالت روانکار بدون افزودن MoS<sub>2</sub> نیز در حدود ۰/۰۰۲ mm<sup>3</sup>/Nm باقی‌مانده است. کاهش میزان ضریب سایش برای پین فولادی نیز با استفاده از MoS<sub>2</sub>، گزارش شد.

بر اساس مطالب فوق، مشخص شد که تحقیق مستقلی در رابطه با بررسی رفتار کشش سرد مفتول اینکونل X750 انجام نشده است و با توجه به اهمیت بالای این محصول، در این تحقیق سعی گردیده است تا فرایند کشش سرد X750 مورد مطالعه قرار گیرد و شرایط بهینه مفتول کشی این محصول مشخص گردد. در تحقیق حاضر ابتدا با مشخص کردن شرایط بهینه آئیل و در ادامه تغییر نوع روانکار، شرایط مناسب مفتول کشی مفتول اینکونل X750 مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از دو نوع روانکار صنعتی و روانکار حاوی MoS<sub>2</sub> برای انجام فرایند مفتول کشی استفاده شده است. مطالعات ریزساختاری، خواص مکانیکی و مطالعات توپوگرافی سطحی برای مشخص شدن فرایند شکل دهی مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

شمش آلیاژی اینکونل X750 به ابعاد 25 × 40 × 13 میلی‌متر توسط کوره ذوب قوس الکتریکی تحت خلأ (VAR) با میزان خلأ ۱۰<sup>-۳</sup> بار و الکتروود تنگستنی، با سه بار ذوب جهت ایجاد ترکیبی یکنواخت، تهیه شد. ترکیب شیمیایی شمش ریخته‌گری شده به همراه محدوده‌ی ترکیب شیمیایی استاندارد این آلیاژ (AMS 5779) در جدول ۱ نشان داده شده است. برای حذف ساختار ریختگی و جدایش‌های عنصری، قبل از نورد شیاری داغ، عملیات همگن سازی در دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۲ ساعت انجام گردید. شکل ۱ شمش آلیاژی را بعد از فرایند ریخته‌گری نشان می‌دهد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی شمش تهیه‌شده و استاندارد سوپر آلیاژ اینکونل X750

درصد وزنی نمونه										
Cu	Si	Mn	C	Ti	Al	Nb	Fe	Cr	Ni	-
0.00	0.00	0.00	0.00	2.75	0.10	0.70	0.00	12.5	Bal.	Min
0.50	1.0	1.0	0.25	1.00	1.00	1.2	11.0	17.5	Bal.	Max
0.06	0.48	0.57	0.04	2.58	0.63	1.20	7.46	16.0	Bal.	-

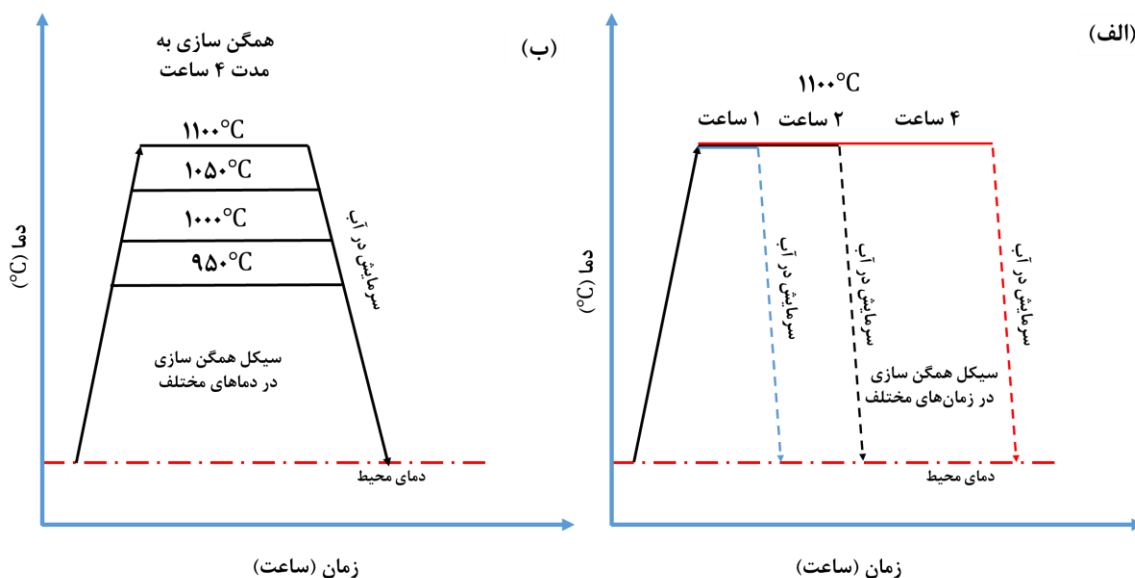
برای انجام فرایند نورد شیاری داغ از دستگاه نورد شیاری آزمایشگاهی به همراه کوره‌ی مقاومتی استفاده شده است. شرایط دمایی فرایند نورد داغ با توجه به محدوده کارگرم این آلیاژ، دمای ۱۱۰۰ °C بوده و نرخ کرنش نیز در حدود ۰/۰۵ بر ثانیه انتخاب شد. بعد از هر پاس نورد داغ به دلیل افت دما، شمش مجدداً در کوره تا دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۱۰ دقیقه حرارت دهی گردید. دمای کار گرم در طول فرایند نورد شیاری داغ به منظور عدم تشکیل رسوب‌های گاما پرایم، از دمای ۹۵۰ °C کاهش پیدا نکرد. درصد کاهش ضخامت در هر پاس، در حدود ۸ الی ۱۶ درصد بوده است. محصول حاصل از فرایند نورد شیاری داغ، مفتول با قطر ۲ میلی‌متر است.

<sup>۱</sup> Wear Coefficient



شکل ۱ تصویر شمش آلیاژ X750 تحقیق حاضر

به منظور افزایش قابلیت کار سرد سوپر آلیاژ، عملیات آنیل در دما و زمان‌های مختلف انجام شد. طرحواره سیکل‌های عملیات حرارتی در دماها و زمان‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲-الف سیکل‌های مربوط به آنیل در زمان‌های مختلف و در شکل ۲-ب سیکل‌های مربوط به آنیل در دماهای مختلف نشان داده شده است. از کوره‌ی تیوبی با اعمال گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد استفاده برای انجام فرایند آنیل استفاده شده است که دقت دمایی ترموکوپل کوره  $\pm 1^\circ\text{C}$  بوده است.



شکل ۲ سیکل‌های عملیات حرارتی آنیل در الف) زمان‌های مختلف و دمای  $1100^\circ\text{C}$  و ب) دماهای مختلف به مدت ۴ ساعت

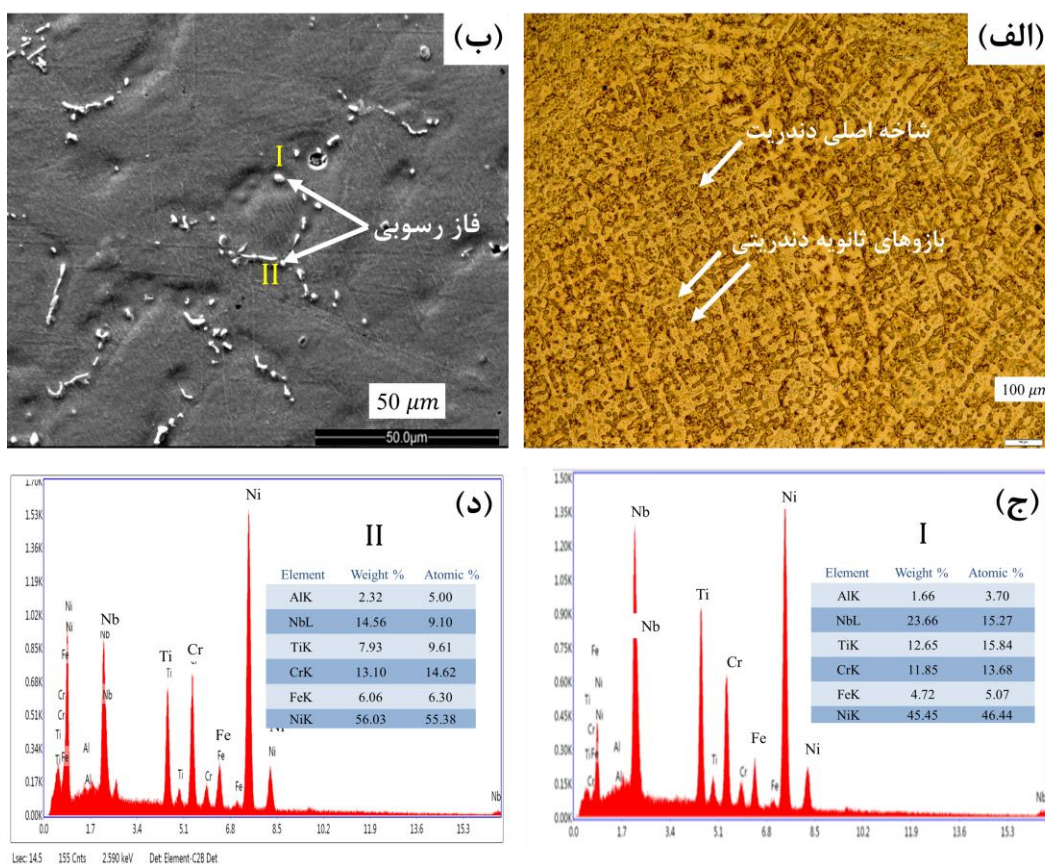
برای انجام فرایند مفتول‌کشی سرد، از دستگاه مفتول‌کشی خطی با کمینه سرعت کشش  $130$  میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. دوزه‌های مفتول‌کشی به تعداد  $11$  عدد با قطر بیرونی  $38$  و ارتفاع  $24$  میلی‌متر و زاویه  $2\alpha$  برابر  $20^\circ$  درجه (زاویه داخلی قالب با محور موازی  $10^\circ$  درجه) در قطرهای داخلی  $2$  تا  $1$  میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. قطر داخلی دوزه‌ها از  $2$  تا  $1/1$  میلی‌متر با گام‌های  $0/1$  میلی‌متر و از قطرهای  $1/05$  و  $1$  میلی‌متر بوده است. در این فرایند دو نوع روانکار با ترکیب گرافیت-روانکار صنعتی (روانکار با درجه NLGI-2 مخلوط روغن صنعتی و صابون پایه لیتیوم به‌عنوان عامل تغلیظ کننده بر اساس استاندارد DIN 51818) و همچنین روانکار ضد فشار دی‌سولفید مولیبدن (OKS 410) با تغلیظ کننده‌ی پایه لیتیوم و ذرات دی‌سولفید مولیبدن) به‌عنوان عامل روانکار در طول فرایند مفتول‌کشی استفاده شده است. برای روانکار صنعتی، علاوه بر عملیات حرارتی آنیل اولیه،  $5$  آنیل بین پاسی در قطرهای  $1/8$ ،  $1/6$ ،  $1/4$ ،  $1/2$ ،  $1/1$  میلی‌متر نیز در دمای  $1100^\circ\text{C}$  به مدت  $1$  ساعت برای بهبود توان کشش سرد مورد استفاده قرار گرفته است. برای شرایط مفتول‌کشی با عامل روانکار ضد فشار، صرفاً در دو قطر  $1/5$  و  $1/2$  میلی‌متر، آنیل بین پاسی انجام شده است که شرایط دمایی و زمانی همانند مفتول‌کشی سرد شده با روانکار صنعتی بوده است. برای مشخصه‌یابی ریزساختاری، به ترتیب

از میکروسکوپ‌های نوری OLYMPUS مدل BX51M و میکروسکوپ الکترونی روبشی QUANTA مدل FEI استفاده شد. مقاطع ریزساختاری توسط نرم‌افزار آنالیز تصویر (MIP4) مورد مطالعه قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری متوسط اندازه دانه نمونه‌ها، حداقل سه تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی‌های مختلف (۱۰۰ و ۲۵۰ برابر) مورد بررسی قرار گرفت و طول و عرض دانه‌ها توسط نرم افزار MIP4 اندازه‌گیری شده و میانگین اندازه دانه ارائه گردید. سختی سنجی نمونه‌ها توسط روش ویکرز و با استفاده از دستگاه INSTRON WOLPERT مدل GmbH انجام گردید و برای انجام آزمون کشش تک‌محوره به‌منظور مشخصه‌یابی خواص مکانیکی مفتول‌ها، از دستگاه Instron مدل R5500 با ظرفیت ۱۰ تن بر اساس استاندارد ASTM E8 استفاده شده است. برای بررسی میزان زبری سطح و نقشه توپوگرافی مفتول‌ها به‌منظور مقایسه ویژگی‌های سطحی مفتول‌های کشش سرد شده با روانکارهای مختلف، از دستگاه پروفیلومتر لیزری سطح مدل LPM-D2 ساخت شرکت کهر با فناوری استفاده شده است. در این آزمون قابلیت اندازه‌گیری زبری سطوح با دقت ۰/۵ میکرومتر و اختلاف سطح ارتفاع با دقت ۱ میکرومتر، به‌صورت غیر تماسی امکان پذیر است. آزمون بر اساس استاندارد ISO 21920-1:2021 انجام شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصه‌یابی ریزساختاری شمش ریختگی اینکونل X750

شکل ۳ تصویر ریزساختاری از سطح مقطع شمش ریختگی سوپر آلیاژ اینکونل X750 با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری (OM) و الکترونی روبشی (SEM) را، نشان داده است. همانطور که در شکل ۳-الف ملاحظه می‌شود. ریزساختار نمونه‌ی ریختگی شامل ساختار دندریتی تک فاز گاما است. تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع ریختگی نمونه وجود رسوب‌های کاربیدی را در ساختار اثبات می‌کند. آنالیز EDS رسوب‌ها نشان می‌دهد که کاربیدهای نایوبیم و تیتانیوم از نوع کاربیدهای MC است که غنی از عناصر نایوبیم و تیتانیوم هستند که به عنوان عناصر اصلی کاربیدزا شناخته می‌شوند.

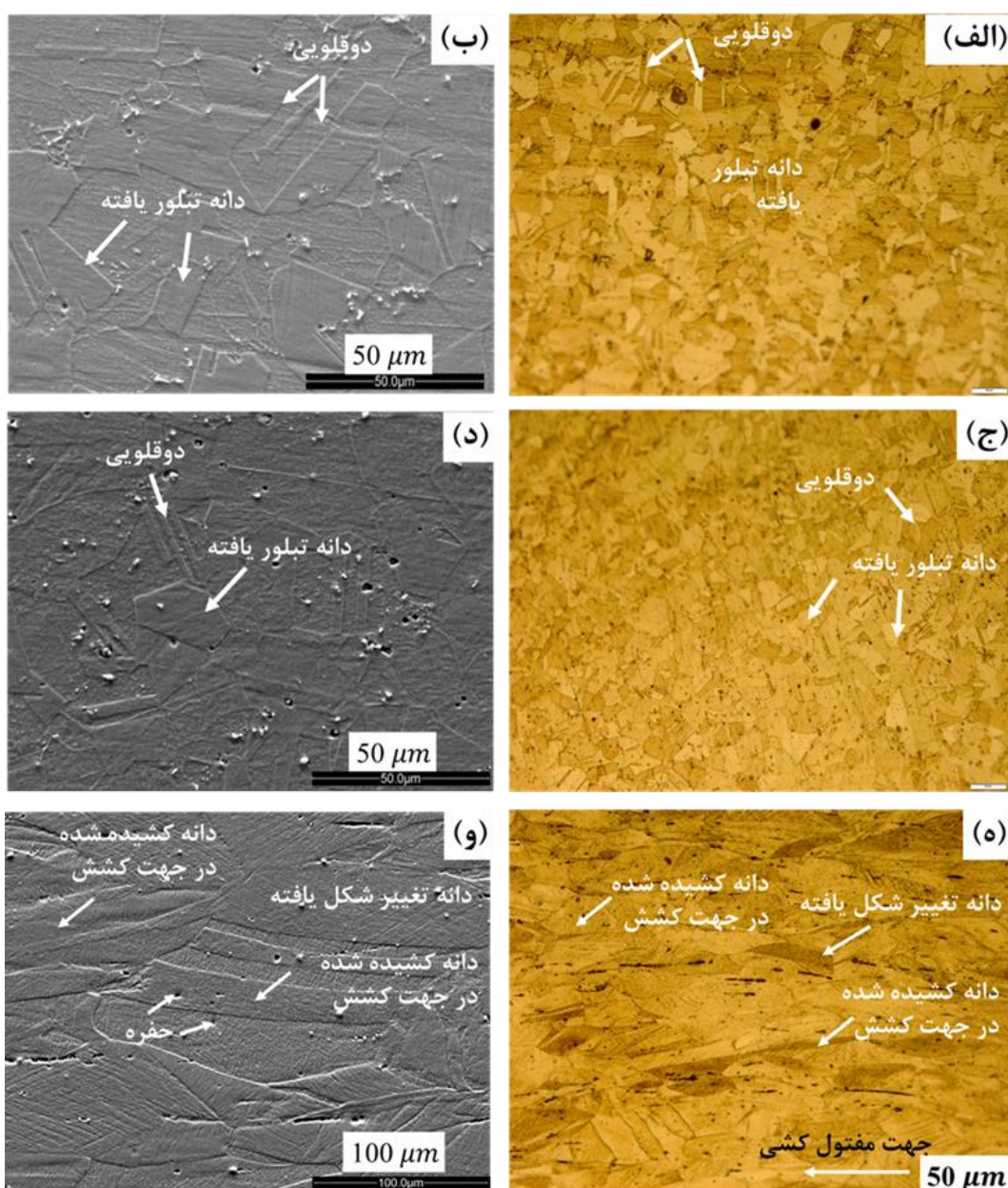


شکل ۳ الف) تصویر OM از ریزساختار شمش X750، ب) تصویر SEM از مورفولوژی فازهای کاربیدی، ج) نتایج آنالیز EDS رسوب و د) نتایج آنالیز EDS رسوب II

رسوب II

### ۳-۲- تأثیر نورد داغ بر ریزساختار سوپر آلیاژ اینکونل X750

شکل ۴، تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از مقطع عرضی نمونه‌های کار گرم شده با قطر ۸ میلی‌متر (۵۵ درصد کاهش سطح مقطع)، ۴ میلی‌متر (۸۸ درصد کاهش سطح مقطع) و مفتول ۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد که مناطق تبلور مجدد و دوقلویی قابل مشاهده است. ساختار دانه‌ای هم‌محور آستنیتی به همراه دوقلوئی‌های ناشی از کارگرم قابل مشاهده است. به دلیل انجام نورد گرم در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  که در ناحیه‌ی دمایی فعال تبلور مجدد دینامیکی قرار دارد تشکیل دانه‌های تبلور مجدد دینامیکی و تشکیل دوقلوئی‌ها مشاهده می‌شود. گزارش شده است که تشکیل دوقلوئی‌های مکانیکی باعث بهبود خواص کار گرم آلیاژ شده و عیوبی نظیر حفره یا ترک در طول فرایند کارگرم در نمونه ایجاد نشده است [۱۷-۱۹]. همچنین فازهای کاربیدی نیز قابل مشاهده هستند (شکل‌های ۴-ب و ۴-د). شکل ۴-ه و ۴-و تصویر ریزساختار مفتول با قطر ۲ میلی‌متر که محصول نهایی فرایند نورد داغ است را نشان می‌دهد. برای این نمونه ساختار تغییر شکل یافته به همراه حفرات تشکیل شده در کنار مرز دانه‌ها و اطراف رسوب‌ها قابل مشاهده است و عموماً دانه‌ها در جهت اعمال نیرو کشیده شده‌اند. لازم به ذکر است که اندازه دانه‌ها در کاهش ۵۵ درصدی و ۸۸ درصدی به ترتیب ۳۷ و ۲۷ میکرومتر اندازه‌گیری شد.

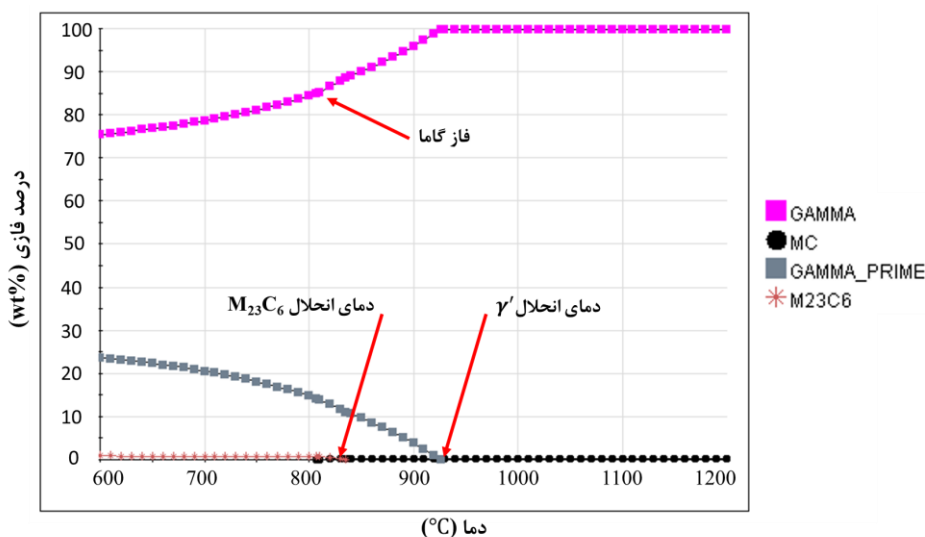


شکل ۴ مقاطع ریزساختاری نمونه‌های کار گرم شده (الف و ب) با قطر ۸ میلی‌متر، (ج و د) با قطر ۴ میلی‌متر، (ه و و) مفتول قطر ۲ میلی‌متر

نتایج سختی سنجی ویکرز روی نمونه‌های ریختگی و نورد گرم شده ۸، ۴ و ۲ میلی‌متر، به ترتیب ۱۸۷، ۳۱۸، ۳۶۸ و ۴۴۱ ویکرز را نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش میزان کار گرم، سختی نیز افزایش یافته است به گونه‌ای که برای نمونه‌ی ریختگی که ساختاری دندریتی داشته، کمترین سختی حاصل شده و با انجام کار گرم و کاهش اندازه دانه، مقدار سختی بیشتر شده و با افزایش میزان کاهش سطح مقطع، میزان افزایش سختی بیشتر بوده است که می‌تواند علاوه بر کاهش اندازه دانه، به علت افزایش دانسیته نابجایی‌ها نیز باشد.

### ۳-۳- تأثیر دما و زمان فرایند آنیل بر خواص مکانیکی و ریزساختار مفتول سوپر آلیاژ X750

گزارش شده است که وجود فازهای رسوبی گاما پرایم و حتی فازهای کاربیدی در مرز دانه‌های فاز گاما، در طول فرایند تغییر شکل سرد سوپرآلیاژهای پایه نیکل به‌عنوان مراکز جوانه‌زنی و اشاعه ترک عمل نموده و منجر به پارگی در سطح مقطع تغییر شکل یافته می‌شود [۲۳]. زمانی که رسوب‌های گاما پرایم در زمینه‌ی گاما وجود دارند، با اعمال تغییر شکل، رسوب‌ها از زمینه‌ی نرم گاما جدا شده و در مرز بین رسوب و فاز گاما حفره ایجاد شده و با افزایش بیشتر تغییر شکل، این حفره‌ها به هم می‌پیوندند و باعث ایجاد ترک شده و نمونه دچار شکست می‌شود [۳] همچنین مشخص شده است که تجمع نابجایی‌ها در اطراف رسوب‌ها، بیشتر از مناطق فاز زمینه است و همین امر باعث تمرکز تنش در اطراف فازهای رسوبی می‌شود [۲۳، ۲۴]. نمودار فازی آلیاژ تهیه شده در شکل ۵ نشان داده شده است. در این نمودار مناطق پایداری فازها مشخص شده است.

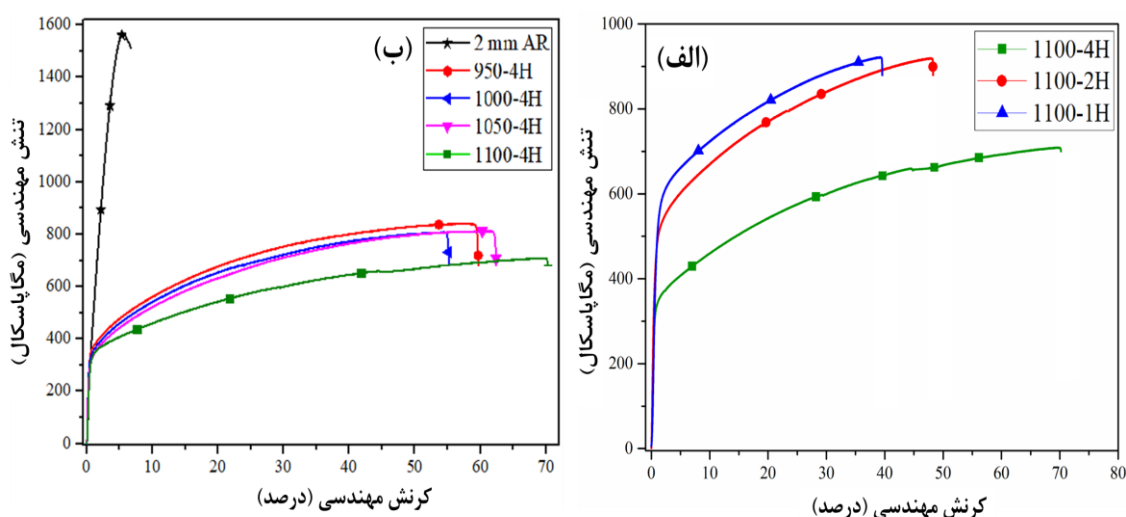


شکل ۵ نمودار فازی سوپر آلیاژ اینکونل X750 و محدوده‌ی دمایی پایداری فازی

بر اساس محدوده‌ی دمایی پایداری رسوب‌های گاما پرایم، و همچنین شرایط آنیل سوپر آلیاژ اینکونل X750 مطابق استاندارد ASTM B637 (UNS N07750)، انجام فرایند آنیل در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  و سپس سرمایش در آب، انحلال کامل فازهای گاما پرایم و کاربیدهای  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  را تضمین می‌کند. لازم به ذکر است دمای  $15 \pm 1080^{\circ}\text{C}$  و نگهداری به مدت ۲ الی ۴ ساعت را برای سوپر آلیاژ اینکونل X750 توسط محقق‌ها پیشنهاد شده است [۷، ۲۱].

نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های آنیل شده در دماها و زمان‌های مختلف به همراه نمونه‌ی بدون اعمال فرایند آنیل در شرایط نورد گرم در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج آزمون کشش، نمونه‌ی بدون فرایند آنیل، دارای استحکام کششی نهایی حدود ۱۵۶۴ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۶/۷ درصد است ولی استحکام و ازدیاد طول برای مفتول‌های آنیل شده در مدت‌زمان‌های ۱، ۲ و ۴ ساعت در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری شد و در جدول ۲ نشان داده شده است. با افزایش دمای آنیل نیز استحکام کاهش یافته و ازدیاد طول افزایش می‌یابد و کمترین استحکام و بیشترین ازدیاد طول نیز برای آنیل در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  و زمان ۴ ساعت به دست آمد. همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است، انجام فرایند آنیل باعث کاهش استحکام کششی و افزایش قابل توجه ازدیاد طول مفتول

سوپر آلیاژ شده است. ریزساختار مقاطع نمونه‌های آنیل شده به مدت زمان‌های ۱ تا ۴ ساعت در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در تصاویر مقاطع میکروسکوپی شکل ۷ مشخص است، علت کاهش تنش تسلیم، بازیابی ساختار و همچنین وقوع تبلور مجدد در ریزساختار است که باعث بهبود شکل‌پذیری گردیده و البته استحکام کششی نهایی نیز کاهش یافته است. همچنین گزارش شده است که با انجام عملیات آنیل، چگالی نابجایی‌ها نیز کاهش می‌یابد و با افزایش زمان فرایند آنیل، ازدیاد طول افزایش و تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی کاهش می‌یابد [۲۰]. در بین پارامترهای آنیل، بیشترین مقدار ازدیاد طول و کمترین تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی برای نمونه‌ی آنیل‌شده به مدت ۴ ساعت به دست آمده است و از این‌رو مدت‌زمان آنیل ۴ ساعت، به‌عنوان پارامتر زمان آنیل در طول فرایند کشش سرد مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است مفتول سوپر آلیاژ در شرایط بدون آنیل، دو مرتبه تحت مفتول‌کشی سرد قرار گرفت و هر دو بار از قسمت ابتدایی مفتول دچار پارگی شد. برای نمونه در شرایط آنیل شده به مدت ۴ ساعت، انجام مفتول‌کشی سرد تا قطر ۱/۷ میلی‌متر بدون پارگی مفتول صورت پذیرفت. کاهش سطح مقطع تا قطر ۱/۷ میلی‌متر معادل کاهش سطح مقطع تا حدود ۲۷ درصد است که بیشتر از میزان مجاز کاهش سطح مقطع گزارش‌شده در کار تحقیقاتی دسوزا و همکاران [۱۵] می‌باشد؛ از این‌رو در ادامه مسیر مفتول‌کشی سرد، آنیل‌های بین پاسی برای بهبود شکل‌پذیری مفتول‌ها در نظر گرفته شد. در قطرهای ۱/۸، ۱/۶، ۱/۴، ۱/۲ و ۱/۱ میلی‌متر، فرایند آنیل بین پاسی انجام گردید.

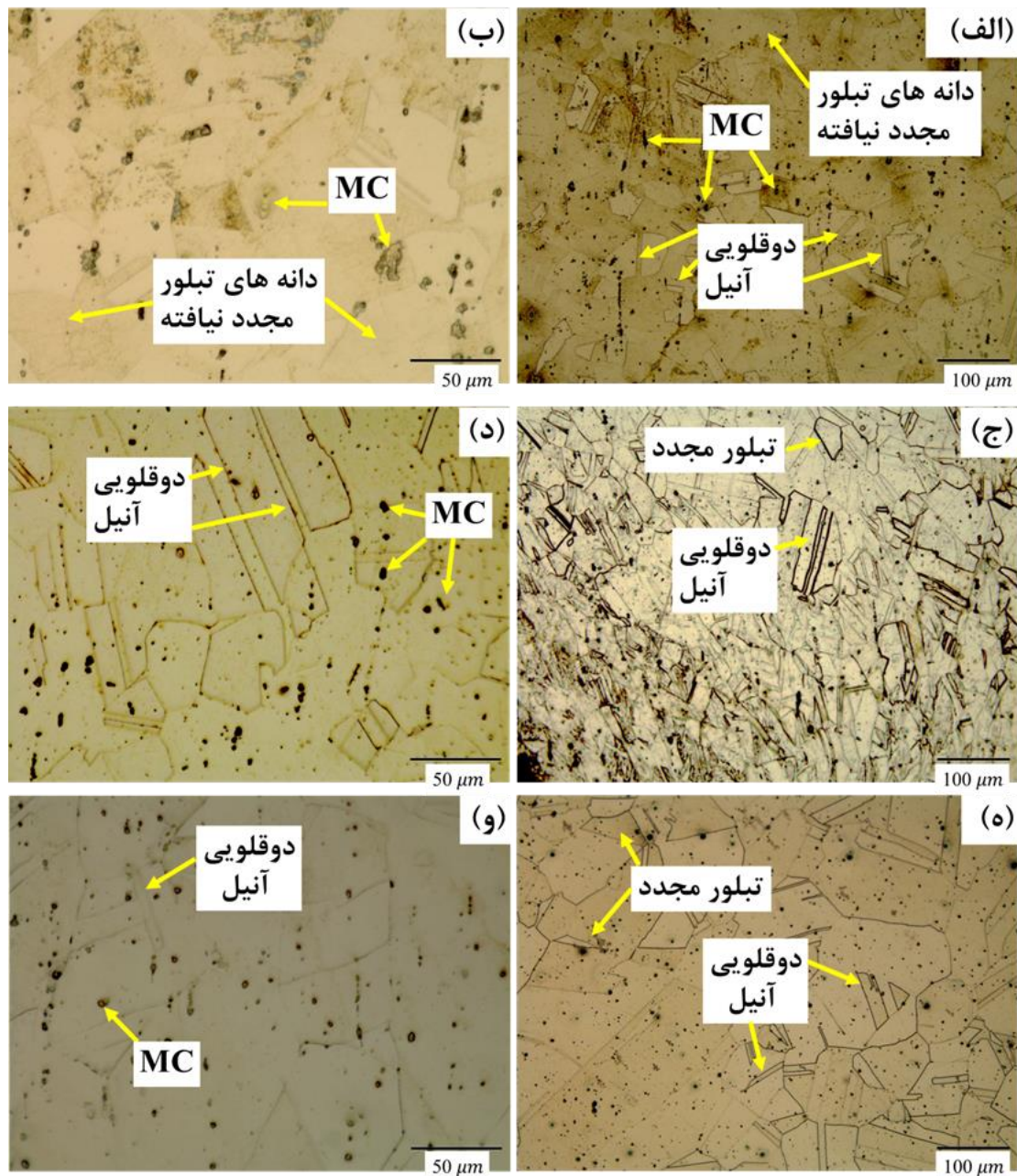


شکل ۶ الف) نمودارهای تنش- کرنش مهندسی مفتول‌های آنیل‌شده (الف) در مدت‌های مختلف و ب) در دماهای مختلف

جدول ۲ مقادیر استحکام کششی نهایی، تنش تسلیم و ازدیاد طول نهایی برای نمونه‌های آنیل شده در مدت زمان‌های ۱ تا ۴ ساعت در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  و نمونه‌ی نوردی آنیل نشده

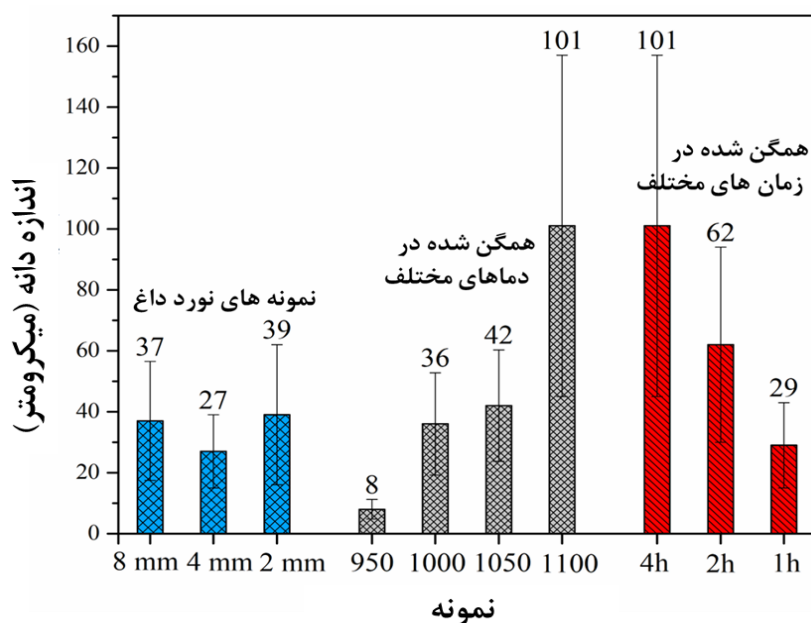
El (%)	YS (MPa)	UTS (MPa)	نمونه
۶/۷	۱۴۰۰	۱۵۴۶	As Rolled
۳۹/۵	۶۰۰	۹۲۱	A1100-1h
۴۹/۰	۵۳۰	۹۱۳	A1100-2h
۷۰/۳	۳۶۰	۷۰۸	A1100-4h

بر اساس شکل ۷ برای نمونه‌ی آنیل شده به مدت ۱ ساعت (شکل‌های ۷-الف و ۷-ب)، تصاویر میکروسکوپی، نشان‌دهنده‌ی ریزساختار با دانه‌بندی ریز (۲۹ میکرومتر) بوده است. همچنین تعداد محدودی دوقلوهای آنیل نیز در این نمونه قابل رؤیت است. برای زمان ۲ ساعت، در مقایسه با نمونه‌ی ۱ ساعت، تعداد دوقلوهای آنیل بیشتر بوده و ساختار تبلور مجدد یافته قابل‌شناسایی است برای نمونه‌ی ۴ ساعت، ساختار به‌طور کامل تبلور یافته و تعداد زیادی از دوقلوهای آنیل به همراه فازهای کاربیدی با اندازه‌ی کوچک‌تر در مقایسه با دو نمونه دیگر قابل رویت است (شکل‌های ۷-ه و ۷-و).



شکل ۷ ریزساختار نمونه‌های آنیل شده‌ی سوپر آلیاژ X750 در دمای ۱۱۰۰ °C و مدت‌زمان، الف، ب، ج، د، ه، و) ۴ ساعت

در شکل ۸ متوسط اندازه دانه فاز گاما برای نمونه‌های کار گرم و آنیل شده در دماها و زمان‌های مختلف نشان داده شده است. برای نمونه‌های کار گرم شده، متوسط اندازه دانه در محدوده‌ی ۲۶ تا ۳۹ میکرومتر اندازه‌گیری شده است. با انجام فرایند آنیل در دمای ۱۱۰۰ °C و با افزایش زمان آنیل، اندازه دانه از ۲۹ تا ۱۰۰ میکرومتر افزایش یافته است. این اندازه‌گیری برای دماهای مختلف آنیل انجام شده و نشان داد که با افزایش دمای آنیل از ۹۵۰ تا ۱۱۰۰ °C از ۸ تا ۱۰۰ میکرومتر افزایش یافته است. برای نمونه‌های کار گرم شده، اندازه دانه مقطع ۴ میلی‌متر در مقایسه با نمونه‌ی ۸ میلی‌متر کاهش داشته است که می‌تواند به دلیل بالا بودن میزان درصد کار گرم در این نمونه باشد لازم به ذکر است اعداد گزارش شده به صورت میانگین ارائه شده‌اند و روند تغییرات اندازه دانه را نشان می‌دهند. بیشترین اندازه دانه‌ی متوسط مربوط به نمونه‌ی همگن‌شده در دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۴ ساعت است که دلیل این امر می‌تواند وجود زمان کافی برای رشد دانه در این نمونه باشد چرا که رشد دانه یک فرایند، وابسته به نفوذ اتمی و زمان است.



شکل ۸ متوسط اندازه دانه فاز گاما برای نمونه‌های نورد شیاری داغ و آنیل شده در مدت زمان و دماهای مختلف

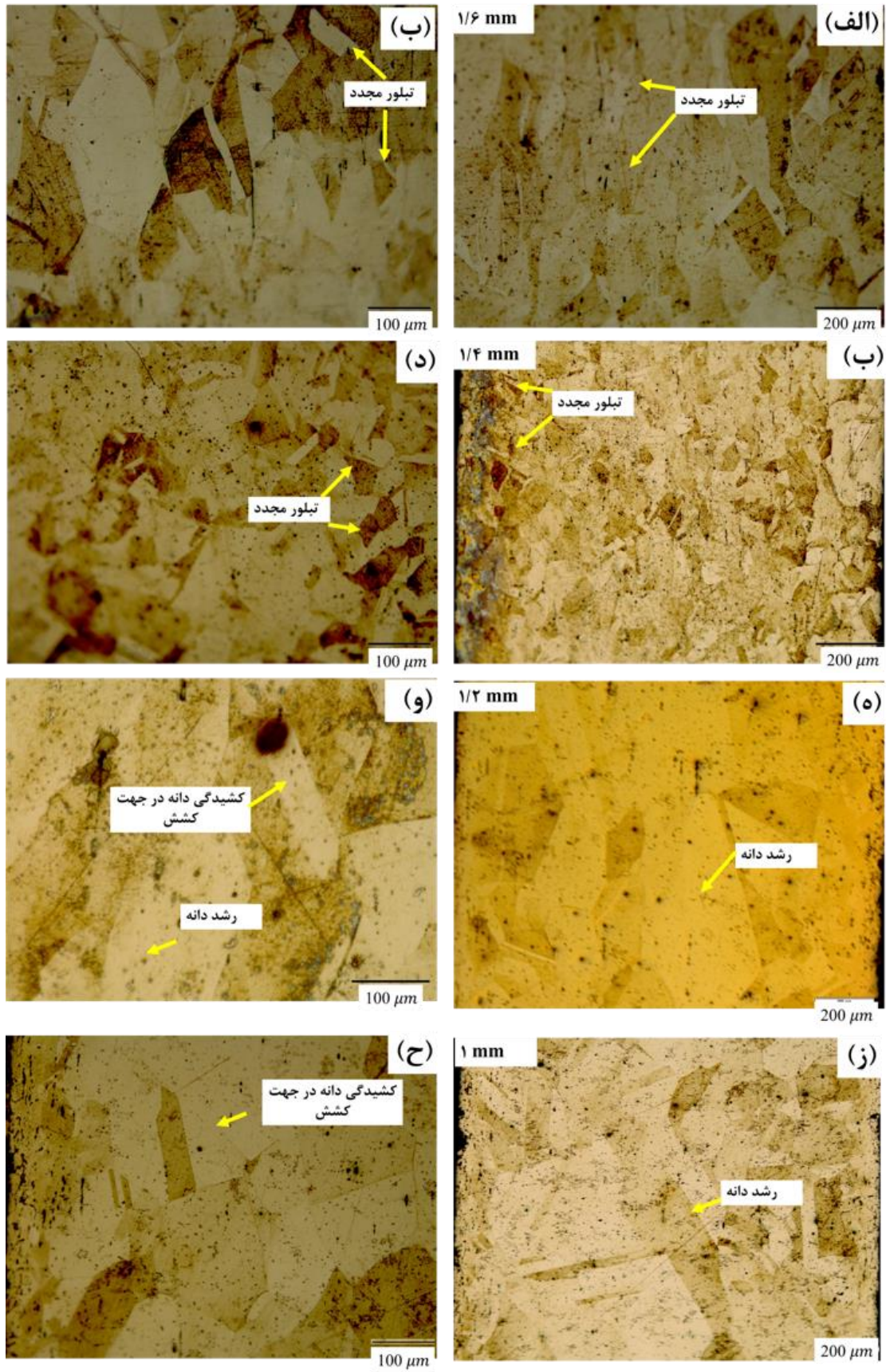
### ۳-۴- بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های کشش سرد شده

#### ۳-۴-۱- تأثیر کشش سرد بر ریزساختار سوپر آلیاژ اینکونل X750

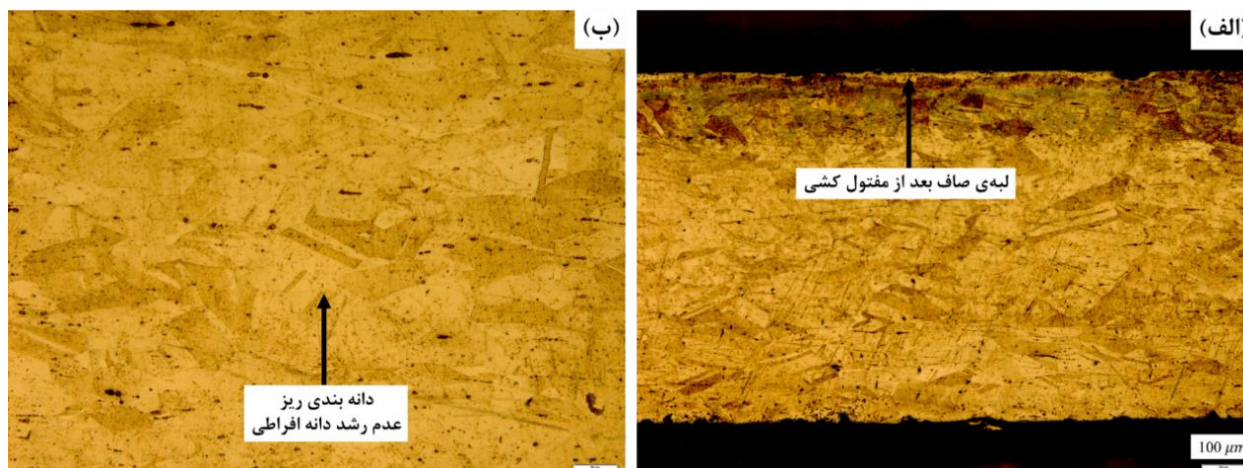
برای بررسی تحولات ریزساختاری نمونه‌های کشش سرد شده، نمونه‌های کشش سرد شده پس از هر مرحله کشش سرد به میزان ۲۰-۳۰ درصد کاهش سطح مقطع (برای قطر ۱/۶ میلی‌متر، میزان کاهش سطح مقطع ۲۰ درصد و برای قطر ۱ میلی‌متر، میزان کاهش سطح مقطع از قطر قبلی ۳۰ درصد بوده است)، تحت آزمون متالوگرافی نوری قرار گرفت. شکل ۹ از بالا به پایین، تصاویر میکروسکوپی از مقاطع عرضی نمونه‌های مفتول کشی شده با قطرهای ۱/۶، ۱/۴، ۱/۲ و ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد که عملیات آنیل بین پاسی بر روی آن‌ها انجام شده و پس از آنیل بین پاسی فرایند کشش سرد ادامه پیدا کرده است. برای ریزساختارهای نمونه‌های ۱/۶ و ۱/۴ میلی‌متر، ساختار با دانه‌بندی ریز و تبلور مجدد یافته مشاهده می‌شود و اندازه‌ی دانه‌ها در لبه‌های مفتول کمتر است که با توجه به درصد بالای تغییر شکل این مناطق، منطقی به نظر می‌رسد. برای نمونه‌های با قطر ۱/۲ و ۱ میلی‌متر با توجه به افزایش تعداد مراحل آنیل در این نمونه‌ها، ساختار دچار رشد دانه شده و دانه‌ها در جهت کشش رشد کرده‌اند.

از یافته‌های فوق می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سیکل‌های آنیل در مراحل نهایی کشش سرد، باعث تشویق رشد دانه شده و همین امر منجر شده تا ساختاری درشت برای نمونه‌های با قطر پایین ایجاد شود و احتمالاً باعث افت خواص مکانیکی این نمونه‌ها می‌شود. از این رو اگر امکان انجام کاهش درصد بیشتر برای هر پاس مفتول کشی با یک مرحله آنیل بین پاسی وجود داشته باشد، تعداد مراحل آنیل نیز کاهش یافته و نمونه‌ها دچار رشد دانه نخواهند شد.

با توجه به خاصیت ضد فشار بودن روانکار  $MoS_2$  و خواص ایجادشده در مفتول‌های کشیده شده با این نوع روانکار، صرفاً با دو مرحله فرایند آنیل در قطر ۱/۵ و ۱/۲ میلی‌متر، قطر نهایی ۱ میلی‌متر حاصل شد. ریزساختار نمونه‌ی مفتول کشی شده با روانکار  $MoS_2$  در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس ریزساختار این نمونه، ساختار نهایی ایجاد شده در مفتول کشیده شده با روانکار  $MoS_2$ ، ساختاری یکدست و ریزدانه است و بر خلاف نمونه‌های کشیده شده توسط روانکار صنعتی، هیچ مناطق رشد دانه‌ای در این نمونه مشاهده نمی‌شود همچنین در شکل ۱۰-الف مفتول حاوی لبه‌های صاف و بدون کندگی یا ترک سطحی است. در ادامه با مطالعات دقیق‌تر تأثیر روانکار بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرد.



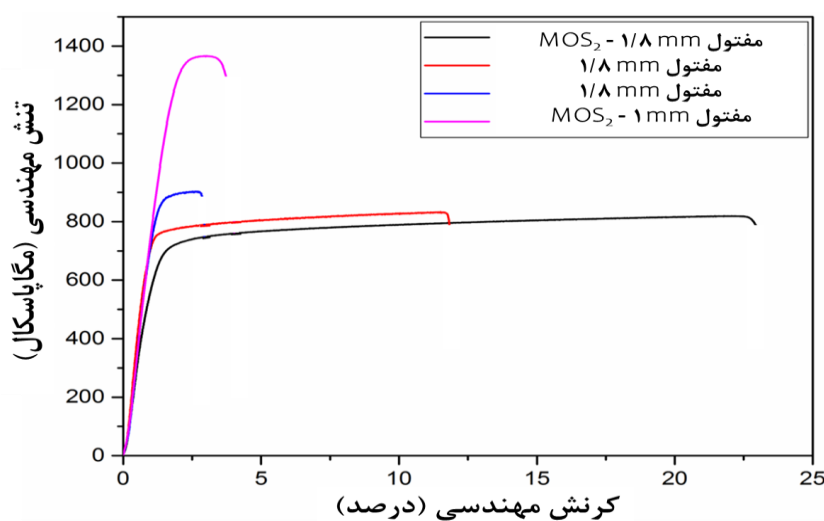
شکل ۹ ریزساختار مفتول آنیل شده در دمای ۱۱۰۰°C به مدت ۴ ساعت. (الف، ب) ۱/۶ mm، (ج، د) ۱/۴ mm، (ه، و) ۱/۲ mm، (ز، ح) ۱ mm



شکل ۱۰ ریزساختار مفتول کشیده شده با روانکار MoS<sub>2</sub> (الف) نمای کلی و عدم مشاهده ترک (ب) ریزساختار و دانه بندی و عدم رشد دانه

### ۳-۴-۲- تأثیر روانکار بر کار سختی ناشی از کشش سرد بر خواص مکانیکی سوپر آلیاژ X750

شکل ۱۱، نمودار تنش- کرنش مهندسی مفتول‌های کشش سرد شده با قطرهای ۱/۸ و ۱ میلی‌متر در مدت‌زمان آنیل ۴ ساعت با روانکارهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص شد، برای نمونه‌ی آنیل‌شده در دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۴ ساعت، ازدیاد طول ۷۰ درصد به دست آمده است (شکل ۶ و جدول ۲). لذا در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود با افزایش میزان کار سرد و کاهش قطر نمونه‌ها، ازدیاد طول به‌صورت خطی کاهش‌یافته و استحکام افزایش داشته است از این رو انجام فرایند مفتول کشی و آنیل بین پاسی، باعث تغییر خواص مفتول شده است.



شکل ۱۱ نمودار تنش-کرنش مهندسی مفتول آنیل‌شده به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۱۰۰ °C توسط روانکارهای مختلف

تولید قطر نهایی ۱ میلی‌متر در دو حالت استفاده از روانکار صنعتی و روانکار حاوی MoS<sub>2</sub>، منجر به افزایش استحکام و کاهش قابل توجه ازدیاد طول شده است. برای نمونه‌ی قطر ۱ میلی‌متر که توسط روانکار حاوی MoS<sub>2</sub> کشیده شده است، استحکام کششی نهایی ۱۳۶۵ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۴ درصد به دست آمده است درحالی‌که برای مفتول کشیده شده با روانکار صنعتی، استحکام کششی نهایی ۹۰۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۲/۹ درصد حاصل شده است. استفاده از روانکار MoS<sub>2</sub> باعث بهبود خواص نهایی مفتول شده است که در ادامه با بررسی‌های سطوح شکست و توپوگرافی سطح دلیل بهبود خواص مفتول با استفاده از روانکار حاوی MoS<sub>2</sub> بررسی خواهد شد.

### ۳-۴-۳- نتایج سختی سنجی

مقادیر ریز سختی نمونه‌های کشش سرد شده در راستای قطر مفتول‌ها، در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای همه‌ی نمونه‌ها، سختی سطح بالاتر از سختی مرکز بوده است به‌گونه‌ای که مقادیر سختی در سطح نمونه‌ها در حدود ۳۵۰ ویکرز و سختی مرکز نیز در حدود ۲۶۰ الی ۲۹۰ ویکرز است. در واقع فرایند کشش سرد- بیشتر باعث تغییر شکل قسمتی از سطح شده است و فرایند کشش سرد تأثیر زیادی بر مرکز نمونه‌ها نداشته است. از این رو کاهش میزان اصطکاک بین قالب و مفتول، می‌تواند در کاهش میزان سختی سطح تأثیرگذار باشد. با بررسی نمودار ریز سختی نمونه روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$  (نمودار مشکی با الگوی لوزی)، مشخص می‌شود که مقادیر سختی سطح و مرکز مفتول در یک محدوده بوده است و همین اختلاف پایین سختی سطح و مرکز، باعث بهبود قابلیت مفتول‌کشی سرد با استفاده از روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$  گردیده است چرا که استفاده از روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$ ، میزان اصطکاک قالب و سوپر آلیاژ اینکونل X750 را کاهش می‌دهد و کاهش اصطکاک منجر به کاهش کارسختی در سطح مفتول می‌گردد. تأثیر روانکار  $\text{MoS}_2$  بر رفتار سایشی اینکونل X750 توسط کومار و همکاران به‌صورت کامل بررسی و بحث شده است [۲۲].

جدول ۳ نتایج آزمون ریز سختی سنجی برای مفتول‌های کشش سرد شده با روانکار صنعتی و روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$

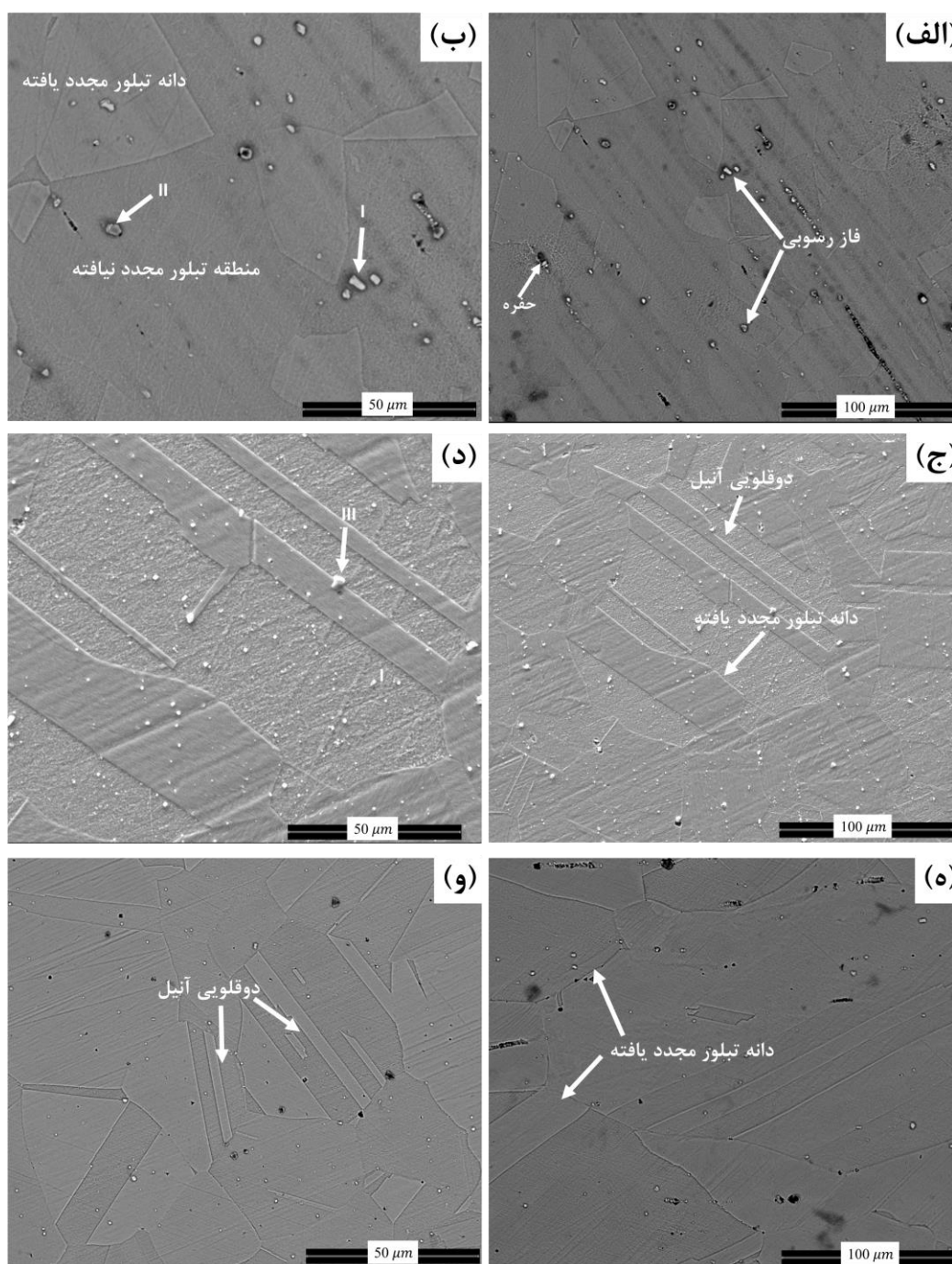
سختی نقطه اثر (ویکرز)						نمونه
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۳۴۹	۳۰۸	۲۹۵	۳۱۰	۳۲۰	۳۶۰	۱/۸ میلی‌متر
۳۳۵	۳۰۳	۲۸۳	۲۷۶	۳۰۰	۳۴۵	۱/۶ میلی‌متر
۳۲۲	۳۱۲	۳۰۶	۳۰۰	۳۱۰	۳۵۵	۱/۴ میلی‌متر
۳۴۶	۳۰۶	۲۷۰	۲۶۸	۳۰۴	۳۳۰	۱/۲ میلی‌متر
۳۱۸	۳۱۰	۲۹۰	۲۸۲	۲۹۶	۳۳۲	۱ میلی‌متر
۲۹۰	۲۷۰	۲۶۰	۲۵۵	۲۷۵	۳۰۰	۱ میلی‌متر- روانکار حاوی $\text{MoS}_2$

### ۳-۵- تأثیر زمان آئیل بر رفتار کشش سرد سوپر آلیاژ اینکونل X750

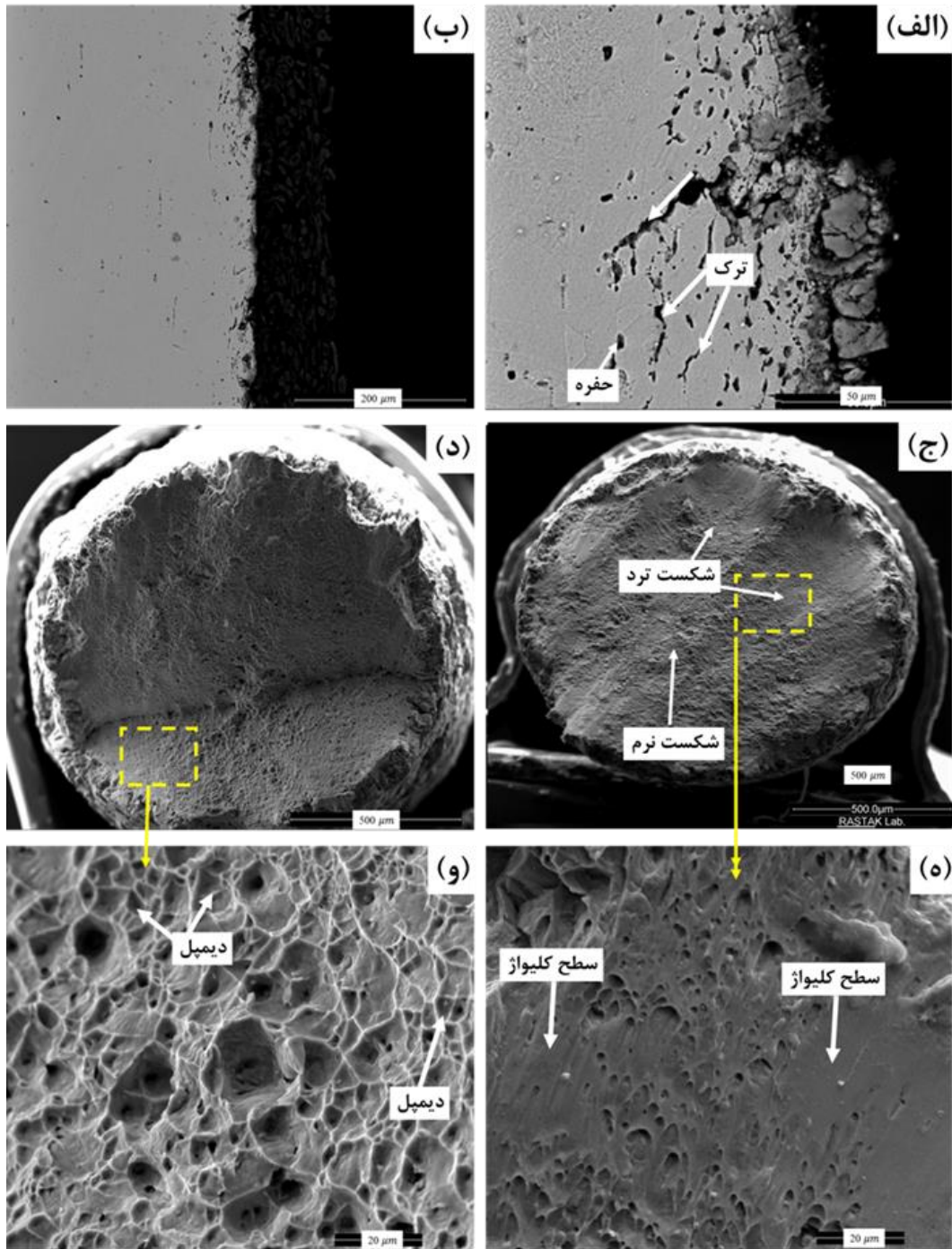
برای بررسی دقیق‌تر ساختار و انحلال رسوب‌ها در مقاطع آئیل شده، در شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مقاطع نمونه‌های آئیل شده به مدت زمان ۱، ۲ و ۴ ساعت را در دمای  $1100^\circ\text{C}$  ارائه شده است. در مدت زمان ۱ ساعت، شکل ۱۲-الف و ب، ساختار هنوز به‌طور کامل دچار تبلور مجدد قرار نگرفته است و همچنین فازهای کاربیدی در قسمت‌های زیادی از ساختار مشاهده می‌شوند. برای مدت زمان آئیل ۱ ساعت، عدم انحلال کامل رسوب‌ها توسط مارش [۳] و بالینگر [۲۰] گزارش شده است. افزایش مدت زمان آئیل به ۲ ساعت، باعث شد تا ساختار به‌صورت کامل تحت تبلور مجدد قرار گیرد ولی همچنان فازهای رسوبی در ساختار باقی‌مانده‌اند (شکل‌های ۱۲-ج و ۱۲-د) و در نهایت افزایش زمان آئیل به مدت ۴ ساعت، باعث کاهش قابل‌ملاحظه‌ی رسوب‌ها شده و ساختاری کاملاً تبلورمجدد یافته ایجاد کرده است. انجام کامل فرایند تبلور مجدد و افزایش تعداد دوقلوبی‌های آئیل، می‌تواند با توجه به کاهش چگالی نابیایی‌ها و بازبایی کامل ساختار، رفتار کشش سرد آلیاژ را بهبود بخشد به‌گونه‌ای که کاهش چگالی نابیایی‌ها توان کار سختی و ظرفیت کاهش سطح مقطع را افزایش داده است [۲۵].

شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مقاطع شکست نمونه‌های آئیل شده در دمای  $1100^\circ\text{C}$  به مدت ۴ ساعت و کشش سرد شده با روانکار صنعتی و نمونه آئیل شده در دمای  $1100^\circ\text{C}$  به مدت ۴ ساعت و کشش سرد شده توسط روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$  را نشان می‌دهد. برای نمونه‌ی کشش سرد شده توسط روانکار صنعتی، انجام فرایند مفتول‌کشی باعث ایجاد حفره و تعداد زیادی ریز ترک در سطح تماس مفتول و قالب شده است (شکل ۱۳-الف). سطح مقطع شکست این نمونه، در لبه‌ها به‌صورت شکست ترد بوده است و مقطع شکست این نمونه، حاوی سطوح کلیواژ است که مشخصه‌ی شکست ترد می‌باشد (شکل ۱۳-ج و ۱۳-ه). برای نمونه‌ی کشش سرد شده با روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$ ، در سطح نمونه، ریزترک و حفره مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۳-ب) و بررسی مقطع شکست این نمونه در اکثر قسمت‌ها، شکست نرم را نشان می‌دهد (شکل ۱۳-د) و وجود دیمپل در سطح شکست این نمونه، مشخصه‌ی شکست نرم است (شکل ۱۳-و).

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، شرایط آنیل در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان ۴ ساعت و استفاده از روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$ ، باعث تولید مفتولی با سطح صاف‌تر و خواص مکانیکی مطلوب‌تری در مقایسه با حالت مفتول‌کشی شده با روانکار صنعتی شده است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از تأثیر مثبت روانکار  $\text{MoS}_2$  در کاهش مقدار ضریب اصطکاک بین قالب و مفتول اینکونل X750 باشد که نیروی اعمالی بر سطح را کاهش داده و باعث ایجاد سطحی صاف و مطلوب بعد از اتمام مفتول‌کشی شده است همچنین ایجاد سختی کمتر در سطح مفتول‌کشیده شده با روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$ ، نشان‌دهنده‌ی اعمال تنش کمتری در حضور این روانکار است که باعث شده فرایند مفتول‌کشی با تعداد مراحل کمتری از آنیل بین پاسی انجام گردد [۲۲]. روانکار حاوی  $\text{MoS}_2$  باعث حفظ لایه‌ی واسط روانکار در سطح تماس مفتول و قالب می‌شود و وجود این لایه واسط و حفظ شدن آن در طول فرایند کشش سرد، انجام موفقیت آمیز مفتول‌کشی را منجر شده است [۲۲].



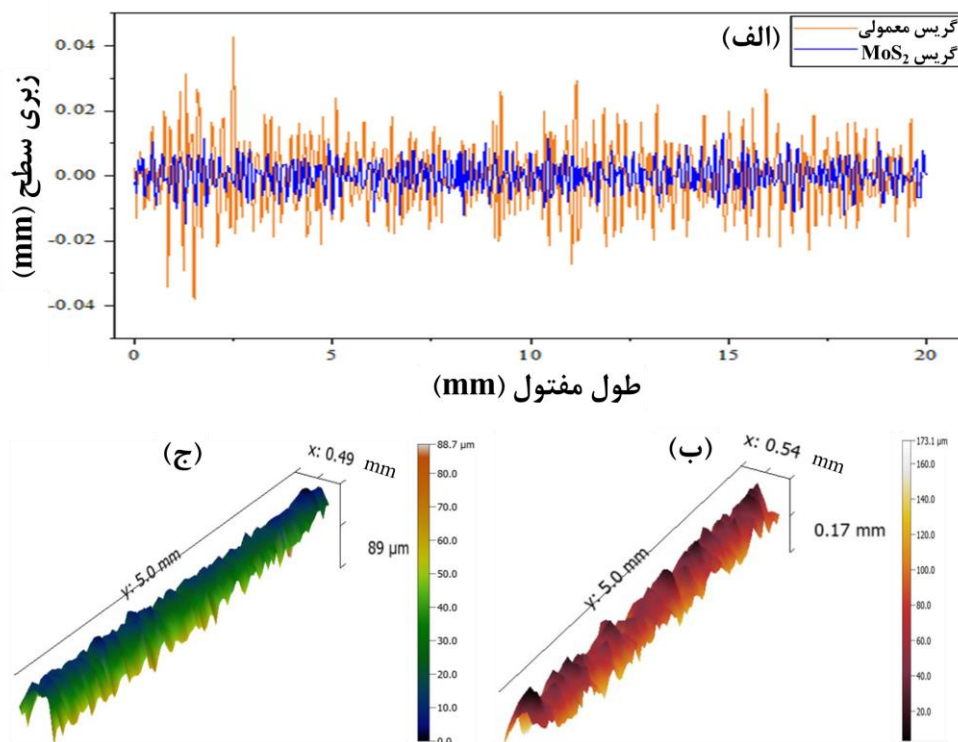
شکل ۱۲ تصاویر SEM نمونه‌های آنیل‌شده در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  به مدت‌زمان‌های مختلف. (الف) و (ب) ۱ ساعت، (ج) و (د) ۲ ساعت، (ه) و (و) ۴ ساعت



شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مقاطع شکست مفتول (الف) کشش سرد شده با روانکار صنعتی، (ب) روانکار MoS<sub>2</sub> ج، (ه) مقطع شکست نمونه با روانکار صنعتی، (د، و) سطح شکست نمونه با روانکار MoS<sub>2</sub>

شکل ۱۴ نمودار زبری سطوح و توپوگرافی سطح مفتول‌های کشش سرد شده با دو نوع روانکار مختلف (شکل ۱۴-الف) را نشان داده است. بر اساس شکل ۱۴-الف، مشخص شده است که متوسط عدد زبری مفتول‌های کشش سرد شده توسط گریس صنعتی و MoS<sub>2</sub> به ترتیب ۸/۳ و ۲/۶ میکرومتر است. شکل ۱۴-ب و ۱۴-ج نیز پروفیل سه‌بعدی توپوگرافی سطوح مفتول‌ها را نشان می‌دهند که با مقایسه این سطوح می‌توان یک‌دست بودن سطح مفتول کشش سرد شده با روانکار حاوی MoS<sub>2</sub> (پروفیل آبی-سبز رنگ) در مقایسه با پروفیل قهوه‌ای رنگ مرتبط با مفتول کشش سرد شده با روانکار صنعتی را تشخیص داد. لازم به ذکر است مقیاس محور عمودی برای شکل ۱۴-ب ۱۷۰ و برای شکل ۱۴-ج نیز ۸۹ میکرومتر است و پستی بلندی‌های شکل ۱۴-ب با در نظر گرفتن مقیاس بزرگ‌تر، از شکل ۱۴-ج بیشتر است از این رو مفتول تهیه شده توسط روانکار حاوی MoS<sub>2</sub>، دارای ویژگی سطحی مطلوب‌تری در مقایسه با مفتول

تهیه شده توسط روانکار صنعتی است. با توجه به مسیر کوتاه تر تولید مفتول با استفاده از روانکار  $\text{MoS}_2$  و ایجاد سطحی صاف تر توسط این روانکار، شرایط بهینه تولید مفتول اینکونل X750 می تواند استفاده از این روانکار باشد چرا که هم باعث کاهش مراحل آنیل بین پاسی می شود و مسیر تولید محصول کوتاه تر و کم هزینه تر می گردد و هم سطح صاف تری ایجاد می کند که باعث بهبود خواص مکانیکی مفتول نیز می تواند باشد.



شکل ۱۴ الف) زبری سطح مفتول های کشش سرد شده با روانکارهای مختلف، ب) توپوگرافی سطح مفتول با گریس صنعتی، ج) توپوگرافی سطحی مفتول با گریس حاوی  $\text{MoS}_2$

#### ۴- نتیجه گیری

تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای دما و زمان عملیات آنیل بر روی نمونه کارگرم شده از سوپر آلیاژ اینکونل X750 از طریق روش نورد شیاری داغ را بر ریزساختار و رفتار کشش سرد نشان می دهد. همچنین بررسی های ریزساختاری و خواص مکانیکی نمونه های تولید شده مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر حاصل گردیده است:

- در این تحقیق شمش سوپر آلیاژ اینکونل X750 توسط کوره قوس الکتریکی تحت خلا ریخته گری شد و شمش با قطر ۲۵ میلی متر به دست آمد. شمش با استفاده از روش نورد شیاری داغ با اعمال چهار مرحله کاهش ضخامت به ترتیب ۸، ۶، ۴ و در نهایت مفتول با قطر ۲ میلی متر تولید شد. بررسی های ریزساختاری تبلور مجدد دینامیکی نشان دادند.
- مفتول تولید شده از روش نورد شیاری داغ، در دمای  $1100^\circ\text{C}$  به مدت زمان ۱، ۲ و ۴ ساعت آنیل شده و تحت کشش سرد قرار گرفت. اعمال آنیل باعث کاهش استحکام کششی از ۱۶۰۰ به ۸۰۰ مگاپاسکال و افزایش ازدیاد طول از ۶ درصد به ۷۰ درصد شد. با افزایش زمان آنیل اندازه دانه و ازدیاد طول افزایش و استحکام کاهش یافت. زمان بهینه آنیل ۴ ساعت مشخص شد.
- استفاده از روانکار ضد فشار  $\text{MoS}_2$ ، به علت حفظ لایه ی روانکار بین مفتول و قالب، میزان اصطکاک بین قالب و مفتول را کاهش داده و مقدار حفره و ترک های سطحی در سطح مفتول کشیده شده به حداقل رسید. نتایج آزمون کشش نشان داد که مفتول کشیده شده با روانکار  $\text{MoS}_2$ ، باعث افزایش استحکام کششی از ۹۰۰ به ۱۲۰۰ مگاپاسکال شده است و زبری سطح را از  $8/3$  به  $2/6$  میکرومتر کاهش داده است.

- بررسی‌های سطوح شکست نشان داد که وجود ترک‌های سطحی در شرایط مفتول کشی سرد در حضور روانکار صنعتی، باعث تشویق شکست ترد شده و در مفتول نهایی، سطح مفتول دارای ترک و حفره‌های سطحی می‌باشد که منجر به افت خواص مفتول می‌گردد ولی استفاده از روانکار دی سلفید مولیبدن باعث کاهش اصطکاک شده و عیوب سطحی را به حداقل رسانده است.

## References

- [1] Rokhgireh H. Numerical Investigation of Creep Behavior Turbine blade made of Inconel 939 Superalloy with different Creep Models. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022 Mar 16;8(12):51-9. [In Persian]
- [2] Buddaraju KM, Sastry GR, Kosaraju S. A review on turning of Inconel alloys. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;44:2645-52. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.673
- [3] Marsh C, Depinoy S, Kaoumi D. Effect of heat treatment on the temperature dependence of the fracture behavior of X-750 alloy. Materials Science and Engineering: A. 2016 Nov 20;677:474-84. doi: 10.1016/j.msea.2016.09.081
- [4] Chen MF, Cao SQ, Dong K. Study on the manufacturing process of large super alloy X-750 forgings for nuclear equipment. In International Conference on Nuclear Engineering 2022 Aug 8; 10.86458. doi: 10.1115/ICONE29-91791
- [5] Changizian P, Yao Z, Xu S, Daymond MR, Griffiths M. Mechanical behavior of recrystallized and precipitation-hardened Inconel X-750 before and after helium-implantation and proton irradiation. Materials Characterization. 2023 Aug 1;202:112970. doi: 10.1016/j.matchar.2023.112970
- [6] Judge CD, Bhakhri V, Jiao Z, Klassen RJ, Was G, Botton GA, Griffiths M. The effects of proton irradiation on the microstructural and mechanical property evolution of inconel X-750 with high concentrations of helium. Journal of Nuclear Materials. 2017 Aug 15;492:213-26. doi: 10.1016/j.jnucmat.2017.04.045
- [7] Marzocca AL, Bozzano P, Nervi J. Microstructural characterization of Inconel X750 alloy used in reactors components. Microscopy and Microanalysis. 2020 Mar;26(S1):95-6. doi: 10.1017/S1431927620000707
- [8] Ha JW, Seong BS, Jeong HW, Choi YS, Kang N. Effects of the aging temperature and stress relaxation conditions on  $\gamma'$  precipitation in Inconel X-750. Journal of Nuclear Materials. 2015 Feb 1;457:362-8. doi: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.093
- [9] Kolagar AM. Additive manufacturing of nickel-based superalloy gas turbine components. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022 Sep 9(3):38-45. doi: 10.22034/IJME.2022.157668 [In Persian]
- [10] Lothongkum G, Khuanheng W, Homkrajai W, Wangyao P. Effect of Pre-heat Treatments on Nano Gamma Precipitation and Mechanical Properties in Wrought Nickel Base Superalloy, X-750. Acta Metallurgica Slovaca. 2006;12(1):7-13.
- [11] Del Valle JA, Picasso AC, Alvarez I, Romero R. Age-hardening behavior of Inconel X-750 superalloy. Scripta materialia. 1999 Jul 9;41(3):237-43. doi: 10.1016/S1359-6462(99)00151-7
- [12] Sinha AK, Moore JJ. Study of precipitation and growth of  $\gamma'$  and dislocation structure in Inconel X-750. Metallography. 1986 Feb 1;19(1):75-86. doi: 10.1016/0026-0800(86)90008-X
- [13] Heydari B, Karimi Zarchi HR. Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate in dry turning of super alloy Inconel 600. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2018 Nov 22;5(3):1-1. [In Persian]
- [14] Ha JW, Seong BS, Jeong HW, Yoo YS, Choi YS, Kang N. Effect of cold drawing ratio on  $\gamma'$  precipitation in Inconel X-750. Materials characterization. 2014 Oct 1;96:1-5. doi: 10.1016/j.matchar.2014.07.016
- [15] de Souza GR, Gabriel SB, Dille J, dos Santos DS, de Almeida LH. Work hardening and aging contribution on the mechanical properties of X-750 nickel-based superalloy. Materials Science and Engineering: A. 2013 Mar 1;564:102-6. doi: 10.1016/j.msea.2012.10.095
- [16] Prasad YV, Rao KP, Sasidhar S, editors. Hot working guide: a compendium of processing maps. 2nd ed. ASM international; 2015 Aug 1:490-493.
- [17] Wang Y, Pan Q, Song Y, Li C, Li Z. Hot deformation and processing maps of X-750 nickel-based superalloy. Materials & Design. 2013 Oct 1;51:154-60. doi: 10.1016/j.matdes.2013.03.081
- [18] Nowotnik A, Peđrak P, Sieniawski J, Góral M. Mechanical properties of hot deformed Inconel 718 and X750. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2012;50(2):74-80.
- [19] Mahmoudi M, Aboutalebi MR, Salehi MT, Moshaver H, Ebrahimi GR, Vafaenezhad H. Microstructure evolution, hot deformation behaviour and processing map of Inconel X-750 superalloy in sub-solvus and super-solvus temperature ranges. Journal of Materials Research and Technology. 2023 Sep 1;26:5594-616. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.08.269

- [20] Ballinger R, Elliott CS, Hwang IS, Prybylowski J. The effect of thermal treatment on the fracture properties of alloy X-750 in aqueous environments. Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (United States); Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, MA (United States); 1993 May 1.
- [21] Arya A, Suwas S, Gérard C, Signor L, Thilly L, Chokshi AH. Strength and microstructure evolution in nickel during large strain wire drawing. *Acta Materialia*. 2021 Dec 1;221:117396. doi: [10.1016/j.actamat.2021.117396](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117396)
- [22] Kumar P, Philip JT, Wani MF, Rai H, Vashishtha H, Kuriachen B, Kumar D. Study of Tribological Properties of EN8 Steel against Inconel X-750 Alloy under Dry and Lubricated Conditions. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023 Sep;76(9):2353-61. doi: [10.1007/s12666-022-02787-z](https://doi.org/10.1007/s12666-022-02787-z)
- [23] Changizian P, Yao Z, Daymond MR. Deformation mechanism characteristics in a Ni-based alloy X-750: Dislocation/precipitate interaction. *Materials Characterization*. 2021 Feb 1;172:110891. doi: [10.1016/j.matchar.2021.110891](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110891)
- [24] Del Valle JA, Picasso AC, Romero R. Work-hardening in Inconel X-750: study of stage II. *Acta materialia*. 1998 Mar 23;46(6):1981-8. doi: [10.1016/S1359-6454\(97\)00425-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00425-4)
- [25] Chen J, Jung P, Rödig M, Ullmaier H, Bauer GS. Ductility recovery in structural materials for spallation targets by post-irradiation annealing. *Journal of nuclear materials*. 2005 Aug 1;343(1-3):227-35. doi: [10.1016/j.jnucmat.2004.09.076](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.09.076)