



## بررسی تغییرات ریزساختار تیتانیوم خالص تجاری در شکل دهی دورانی گرم مقاومتی

محسن غفاری<sup>۱</sup>، مجید الیاسی<sup>۲\*</sup>، محمدجواد میرنیا<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

\* بابل، صندوق پستی ۴۸۴، elyasi@nit.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۳ مرداد ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۲ شهریور ۱۴۰۱

پذیرش: ۲۵ شهریور ۱۴۰۱

### کلیدواژگان:

شکل دهی دورانی گرم مقاومتی

ریزساختار

اندازه دانه

تبلور مجدد

سختی

در این تحقیق تأثیر تغییرات شدت جریان بر تغییرات ریزساختار شکل دهی دورانی گرم مقاومتی تیتانیوم خالص تجاری بررسی شده است. بدین منظور، مجموعه‌ای جهت اعمال گرمایش مقاومتی به ورق تعبیه گردید و پیکربندی دستگاه به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که در حین فرایند شکل دهی چرخشی، بتوان همزمان گرمایش مقاومتی را اعمال کرده و ورق‌های تیتانیوم را به صورت مخروط ناقص تحت فرایند شکل دهی دورانی گرم مقاومتی قرار داد. سپس، با انجام آزمایش در شرایط مختلف شکل دهی با تغییر در شدت جریان عبوری در ضخامت و نرخ باردهی ثابت، قطعات مختلفی بدست آمده و ریزساختار ماده و دانه بندی آن، در حالت‌های مختلف شکل دهی و در قسمت‌های مختلف آن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که نیروی اعمالی در شکل دهی دورانی در گرمکاری مقاومتی در همه شدت‌های جریان سبب ریزدانه شدن ماده شده است اما از یک میزان شدت جریان مشخص، ماده بعد از اتمام تبلور مجدد فرصت بیشتری داشته که در دماهای بالاتر بماند و به این خاطر امکان بیشتری برای رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته فراهم بوده است. همچنین تغییرات سختی در مقیاس ویکرز نیز در شدت جریان‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان در تمام قسمت‌های قطعه، سختی آن افزایش یافته که این نرخ افزایش در قسمت‌های دیواره قطعه که تحت تنش‌های مکانیکی حاصل از نیروهای ابزار نیز قرار داشته بیشتر از کف قطعه بوده است.

## Investigating the microstructure variation of commercially pure titanium in hot resistance spinning

Mohsen Ghafari, Majid Elyasi\*, Mohammad Javad Mirnia

Mechanical Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

\* P.O.B. 484 Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 14 August 2022

First Decision: 24 August 2022

Accepted: 16 September 2022

### Keywords:

Hot spinning

Microstructure

Grain Size

Recrystallization

Hardness

### Abstract

In this paper, the effect of current intensity on changes in the microstructure of the hot resistance spinning of commercially pure titanium alloy has been investigated. For this purpose, a set-up for applying resistance heating to the sheet was installed and the configuration of the machine was designed and built in such a way that during the spinning process, resistance heating can be applied simultaneously and titanium sheets can be made into cones. The incomplete part was subjected to the hot resistance spinning process. Then, by conducting experiments in different forming conditions with a change in the intensity of the passing current at a constant thickness and feedrate, different parts were obtained and the microstructure of the material and its granulation, in different forming states and in the part of its various aspects have been studied. The results from this research show that the force applied in spinning in resistance heating at all current intensities has caused the material to become fine. But from a certain current intensity, the material has more time after the completion of recrystallization to remain at higher temperatures, and because of this, there is a greater possibility for the growth of recrystallized grains. Also, the hardness changes in the Vickers scale in the intensity of different currents show that with the increase in the intensity of the current in all parts of the piece, its hardness has increased. Moreover the rate of increase in the parts of the wall of the piece that are under the result of mechanical stresses among the forces of the tool was more than the bottom of the part.

### ۱- مقدمه

تجهیزات لازم، جایگاه قابل رقابتی را در مقایسه با بسیاری از فرآیندهای مشابه مانند کشش عمیق و هیدروفرمینگ دارد [۱-۶].

روش‌های مختلف گرمایش در زمینه شکل دهی دورانی گرم و تغییرات ریزساختار ماده تحت شرایط گرمایی همواره مورد

فرایندهای حجمی و ورق‌های شکل دهی از جمله فرایندهایی هستند که کاربرد بسیار زیادی در صنایع مختلف فلزی دارند. شکل دهی دورانی یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای شکل دهی ورق‌های فلزی است که به دلیل مزایای آن مانند سادگی ابزار و

Please cite this article using:

M. Ghafari, M. Elyasi, M. J. Mirnia, Investigating the microstructure variation of commercially pure titanium in hot resistance spinning, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 36- 46, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.159960>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

افزایش دمای گرم‌کاری از  $350^{\circ}\text{C}$ ، به دلیل تبلور مجدد، درصد تغییر طول افزایش یافته و شکل‌پذیری بهبود یافته است. رومرو و همکاران [۱۰] با استفاده از انرژی گرمایی لیزر، بهبود شکل‌پذیری فولادهای با استحکام بالا (DP600 و DP780) در شکل‌دهی دورانی را بررسی نمودند. با اندازه‌گیری تنش‌های باقیمانده، میکروساختار، میکروسختی و EBSD در این پژوهش، اثر ترکیبی استفاده از لیزر در حین شکل‌دهی دورانی قطعات مذکور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. براساس این پژوهش مشخص شد که برخلاف شکل‌دهی سرد، در هنگام شکل‌دهی به کمک لیزر، در ناحیه تغییر شکل، حدود ۶۰٪ پیدایش دانه‌های فرتی تبلور مجدد یافته مشاهده شده است. همچنین، نتایج عکس‌برداری EBSD و TEM نشان داد که استفاده از لیزر سبب فعال شدن تبلور مجدد دینامیکی در حین تغییر شکل، تحرک نابجایی‌ها و کاهش اعوجاج دانه و شکل‌گیری ریزدانه‌ها می‌شود که این امر بیانگر شکل‌پذیری بهتر و بهبود خواص مکانیکی بوده است.

هان و همکاران [۱۱] با تکیه بر آنالیز ریزساختار و خواص آلیاژ آلومینیوم 3A21، تأثیر دمای گرم کردن را در چند نرخ کاهش ضخامت مختلف، بر روی ویژگی‌های قطعات لوله‌ای شکل بررسی نمودند که طی آن با تغییرات دمای گرم‌کردن، خواص مکانیکی مختلفی بدست آمد. بر اساس این پژوهش که با گرم‌کردن قطعه به روش القایی انجام شده، مشخص گردید اگر دمای گرم‌کردن بیش از حد کم باشد، بهبود شکل‌پذیری قطعه بدست نیامده و سبب ایجاد عیوب در آن می‌شود. این در حالی است که بالا بودن بیش از حد این دما نیز سبب افزایش رشد دانه و جمع‌شدن ماده و انباشتگی آن خواهد شد.

هومبرگ و همکاران [۱۲] در پژوهشی برای شکل‌دهی قطعات با هندسه دوار و پیچیده از لوله‌ها، پروفیل‌ها و ورق‌های فلزی، شکل‌دهی دورانی را با جوشکاری اصطکاکی تلفیق داده و روش جدیدی را در شکل‌دهی دورانی گرم ارائه کردند. در این پژوهش مشخص شد پس از شکل‌دهی، اندازه دانه‌ها کاهش یافته و نمودار تنش کرنش ماده تغییر کرده است.

چن یانگ و همکاران [۱۳] تغییر شکل ریزساختار آلیاژ تیتانیوم TA15 در حین شکل‌دهی گرم را بررسی نمودند که بر اساس آن، مشخص گردید که تغییر شکل لغزشی و پس از آن، دوقلوبی مهمترین مکانیزم شکل‌دهی هستند. همچنین بر اساس این پژوهش، با افزایش درصد کاهش ضخامت دیواره قطعه، فاز اولیه آلفا و میکروسختی و نیز کشیدگی دانه‌های میکروساختار در امتداد محوری افزایش می‌یابد. بررسی تغییر میکروسختی

توجه محققان در این زمینه بوده است. چن و همکاران [۷] قطعاتی لوله‌ای شکل از آلیاژ تیتانیوم TA15 را با استفاده از ماشین شکل‌دهی دورانی کنترل عددی در پنج مرحله تحت تغییر شکل برشی و کاهش ضخامت قرار دادند. برای این منظور قطعات مورد نظر را ابتدا تا دمای  $650^{\circ}\text{C}$  در کوره، پیش‌گرم کرده و سپس با شعله در محدوده دمایی  $600^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$  دمای آن را حفظ کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کشیدگی دانه‌ها در امتداد طولی به مراتب بیشتر از امتداد محیطی است. همچنین آنها دریافتند که در حین فرآیند، تحول در ریزساختار سبب تغییر در خواص مکانیکی ماده نیز می‌شود که این موضوع با بررسی تغییرات استحکام کششی و تغییر طول نسبی ماده پس از هر پاس و به ازای مقادیر مختلفی از درصد کاهش ضخامت نشان داده شد. در ادامه، قطعات شکل داده شده در دو دمای مختلف  $700^{\circ}\text{C}$  و  $850^{\circ}\text{C}$  تحت آنیل کردن قرار گرفتند و این نتیجه بدست آمد که برای بدست‌آوردن استحکام و چقرمگی مناسب، دمای آنیل کردن قطعات شکل‌دهی دورانی شده تیتانیومی، نباید بالاتر از دمای تبلور مجدد ماده باشد.

ژیاو و همکاران [۸] در پژوهشی برای شکل‌دهی گرم لوله‌های اکستروژن شده از آلیاژ آلومینیوم، تأثیر شکل‌دهی دورانی برشی گرم رو به عقب را بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار نهایی ماده بررسی نمودند. برای این منظور جهت گرمایش قطعه تا دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ، از یک کوره گرم‌کننده مقاومتی به همراه ابزار غلتکی که در طول مسیر شکل‌دهی قابل حرکت بود استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان از واپیچش شدید ریزساختار ماده داشته و در حالت کلی بعد از شکل‌دهی، یک باند اتصال یکنواخت حاصل گردید که نتیجه کلی آن بهبود ریزساختار ماده و کاهش در ناهمسانگردی آن بوده است.

موری و همکاران [۹] شکل‌دهی دورانی برشی آلیاژهای آلومینیوم در حالت گرم را جهت بدست آوردن توزیع ضخامت مطلوب انجام دادند. جهت ایجاد گرمایش، قطعه‌کار، اطراف ورق، ماندل و ابزار را با حفاظ فولادی، ایزوله کرده و با دمش هوای گرم تا  $700^{\circ}\text{C}$ ، آنها را گرم کردند. در این پژوهش، از گرافیت خشک به عنوان روانکار استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با شکل‌دهی برشی گرم، ساختار دندریتی و حفره‌های انقباضی موجود در ساختار آلیاژ، بدون بوجود آمدن شکست در ورق برطرف شده است. با نمونه‌برداری از قطعات شکل داده شده و انجام آزمون کشش مشخص گردید که با افزایش درصد کاهش ضخامت، استحکام کششی افزایش یافته و درصد تغییر طول تقریباً بدون تغییر باقی‌مانده است. همچنین مشخص گردید با

کاهش ضخامت ۳۰٪، ۵۰٪ و ۶۸٪ در آن‌ها ایجاد نمودند. پس از شکل‌دهی، ریزساختار ماده - که در ابتدا دارای اندازه دانه ۱۸ و ۴۰ میکرومتر بوده است - و نیز خواص مکانیکی آن‌ها به کمک آزمون کشش ساده از روی نمونه‌های بریده شده از قطعه شکل داده شده بررسی شد. نتایج این پژوهش بیانگر این بود که سختی و استحکام کششی با افزایش درصد تغییر شکل، افزایش یافته است. علت را می‌توان به اصلاح دانه‌ها، استحکام ذرات و استحکام بخشی عناصر آلیاژی منیزیم و منگنز نسبت داد.

جان و ریو [۱۸] در راستای توسعه دادن برای شکل‌دهی فلزاتی که شکل‌پذیری پایینی دارند، روش جدیدی را پیشنهاد دادند که طی آن نورد برخی از ورق‌های فلزی را با گرم‌کاری مقاومتی تلفیق داده و شکل‌پذیری ضعیف آن‌ها را بهبود بخشیدند. برای این منظور، چهار جنس مختلف شامل تیتانیوم خالص، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، اینکونل ۶۰۱ و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را انتخاب کرده و قبل از شکل‌دهی با غلتک‌های اصلی، توسط غلتک‌های دیگری در مسیر جریان الکتریسیته قرار دادند که طی آن با عبور جریان برق، ورق مربوطه گرم شده است. به ازای شش نمونه مختلف که از جنس آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V انتخاب شده ریزساختار قطعه قبل و پس از شکل‌دهی را نیز بررسی نمودند.

وانگ و همکاران [۱۹] با انجام آزمون‌های تجربی یک مدل ساده از تحلیل تنش در ناحیه تغییر شکل در حین شکل‌دهی دورانی برشی را ارائه نموده و سپس با بررسی تغییر دمای ناحیه شکل‌دهی با تغییر شدت جریان مصرفی، تغییرات میکروسختی و ریزساختار ماده را نیز بررسی کردند. نتایج تحلیل ریزساختار نشان داد که گرم‌کاری مقاومتی سبب می‌شود ماده زودتر به تبلور مجدد برسد. همچنین با بررسی میکروسختی ماده قبل و پس از شکل‌دهی در شدت جریان‌ها مختلف، مشاهده شده که با افزایش شدت جریان مصرفی، میکروسختی به مقدار اندکی کاهش یافته است.

جان هو و همکاران [۲۰] میکروساختار لوله‌های شکل‌دهی دورانی شده از آلیاژ Cu-Sn را با استفاده از EBSD و TEM قبل و پس از شکل‌دهی و پس از آنیل کردن بررسی نمودند. نتایج حاصل بیانگر این بوده که فاز آلفا پس از شکل‌دهی بهبود یافته و خواص مکانیکی ماده نیز بهتر شده است. با انجام آزمون‌های کشش قبل و پس از شکل‌دهی و پس از آنیل در دو دمای ۴۰۰°C و ۵۰۰°C مشخص شد که شکل‌دهی دورانی لوله و آنیل کردن می‌تواند استحکام کششی ماده را بدون تغییر قابل توجه در چقرمگی ماده افزایش دهد.

قطعات شکل داده شده نیز نشان داده است که با افزایش درصد کاهش ضخامت، میکروسختی نیز افزایش یافته است که دلیل آن بیشتر شدن کارسختی بوده است.

ژان و همکاران [۱۴] در پژوهشی برای بررسی تأثیر نسبت انحراف و دمای شکل‌دهی در شکل‌دهی دورانی برشی گرم آلیاژ تیتانیوم TA15، سه نسبت انحراف مثبت، صفر و منفی را در نظر گرفته و دقت ابعادی و تحول ریزساختار را در شرایط مختلف حالت گرم بررسی نمودند. بر اساس این پژوهش که در آن از روش گرم‌کاری به کمک شعله اکسی‌استیلن استفاده شده، مشخص گردید که شکل‌دهی دورانی برشی گرم آلیاژ TA15 می‌تواند سبب ریزساختار غیریکنواخت و کاهش در اندازه دانه‌ها از سطوح داخلی به سمت سطوح خارجی شود، که این امر، خود از تغییر شکل غیریکنواخت در امتداد ضخامت به دلیل تغییر در اصطکاک، دما و تغییر شکل در امتداد ضخامت ناشی می‌شود.

ژائو و همکاران [۱۵] توزیع کرنش معادل در شکل‌دهی دورانی لوله‌های فولادی بدون درز ASTM1020 را در دو حالت مختلف از نظر نصب و قرار ابزار بررسی نموده و مدل جریان ماده را بر اساس حد کران بالا تحلیل بدست آوردند. برای اعتباردهی به این نتایج، شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمون متالوگرافی نیز از قطعات شکل داده شده انجام دادند و نتایج آن نشان داد که اگر در شکل‌دهی دورانی لوله، ابزار در مقابل هم قرار داشته باشد، برخلاف حالت چند مرحله‌ای، توزیع کرنش، در دیواره قطعه، همگن بوده و کشیدگی دانه‌ها در دیواره‌های داخلی و خارجی بیشتر خواهد بود.

سه نوع از فلزات سبک‌وزن استحکام بالا که در صنایع مختلف هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند، در پژوهشی که توسط آمبروجیو و همکاران [۱۶] انجام شد در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم مقاومتی مورد بررسی قرار گرفتند. این فلزات که شامل آلیاژ آلومینیوم AA2024-T3، آلیاژ منیزیم AZ31B-O و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بود به کمک یک منبع جریان برق مستقیم گرم شده و تحت شکل‌دهی قرار گرفتند. در این پژوهش، ریزساختار قطعات شکل داده شده در حالت شکل‌دهی سرد و پس از شکل‌دهی گرم مقاومتی به کمک میکروسکوپ الکترونی نیز بررسی شد.

زندووی و همکاران [۱۷] در پژوهشی، تأثیر اندازه دانه اولیه و درصد کاهش ضخامت بر روی ریزساختار، ویژگی‌ها و رفتار تغییر شکل آلیاژ آلومینیوم AlMg<sub>6</sub>Mn در حین شکل‌دهی دورانی برشی را بررسی نمودند. در این پژوهش، طی فرآیند شکل‌دهی دورانی برشی یک پاسه به کمک ماندلر مخروطی،

جریان الکتریکی و گرم کردن قطعه‌کار، مطابق شکل ۱ تجهیزات ابزار و قطعه‌کار به گونه‌ای پیکربندی شده است که پس از برقراری تماس بین ابزار و ورق قطعه‌کار، جریان از ابزار وارد شده و پس از عبور از ورق، از سمت مرغک توسط نگهدارنده گرافیتی به کابل‌های خروجی متصل گردد.

از آنجا که قالب نسبت به جریان الکتریسیته و حرارت عایق است، هیچ گونه انتقال جریان به سایر تجهیزات ماشین‌ابزار نداشته و تبادل حرارتی آن نیز قابل اغماض خواهد بود. بدین ترتیب، ورق به عنوان یک مقاومت اهمی در مسیر عبور جریان برق قرار داشته و با تغییر شدت جریان در مدار، دمای ورق نیز بطور پیوسته تغییر کند. برای اندازه‌گیری دمای ناحیه تحت تغییر شکل، از دماسنج مادون قرمز استفاده شده و در شدت جریان‌های مختلف، دمای متناسب با آن اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص مورد استفاده در این پژوهش

Table 1 The chemical composition of pure titanium used in this research

درصد	عنصر
۰/۰۳	Fe
۰/۰۳	N
۰/۲۵	O
۰/۰۱۵	H
۰/۰۶	C
Base	Ti

جدول ۲ خواص مکانیکی تیتانیوم مورد استفاده در این پژوهش

Table 2 Mechanical properties of titanium used in this research

مقدار	خواص
۳۰۸MPa	استحکام کششی
۳۸۲MPa	استحکام نهایی
۳۳	درصد ازدیاد طول
۴/۵۱gr/cm <sup>3</sup>	چگالی
۳۲	درصد کاهش سطح مقطع

این پژوهش به کمک ماشین تراش انیورسال انجام شده و مسیر حرکت در حین شکل‌دهی بصورت ترکیبی از محدب و مقعر و بصورت رفت و برگشتی و چند پاسه در نظر گرفته شده که برای بررسی دقیق‌تر صافی سطح نهایی، مسیر آخر به صورت یک‌پاسه و خطی یکنواخت در امتداد مولد مخروط انجام شده است. پیکربندی ابزار و قطعه‌کار نصب شده بر روی دستگاه در شکل (۲) نشان داده شده است.

یکی از موارد قابل بررسی در مطالعه خواص مکانیکی قطعات شکل داده شده بررسی سختی آنها می‌باشد. برای این منظور،

وانگ و همکاران [۲۱] در بررسی افزایش استحکام برای قطعات آلومینیومی شکل‌دهی دورانی شده از آلیاژ AA3003 که قابلیت عملیات حرارتی ندارند، تکنیک تغییر روش شکل‌دهی برای بهبود ریزساختار را پیشنهاد داده و دریافتند که با این روش در نسبت کاهش ضخامت یکسان، کرنش پلاستیکی معادل هم‌زمان با کرنش برشی بزرگتر نسبت به شکل‌دهی یک پاسه و دوپاسه معمولی بدست خواهد آمد. بررسی ریزساختار این قطعات نیز نشان داده پس از این روش شکل‌دهی دانه‌بندی ماده بهبود یافته و از عدد اندازه دانه ۴۸/۶ قطعه خام به ۳/۷۷ کاهش یافته در حالی که برای قطعات بدست آمده از شکل‌دهی دورانی معمولی یک پاسه و دو پاسه به ترتیب ۷/۱۷ و ۴/۹۱ بوده است. با جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرایند شکل‌دهی دورانی، نوآوری پژوهش حاضر در بررسی تغییرات ریزساختار ماده تیتانیوم خالص تحت فرآیند شکل‌دهی دورانی با گرمایش مقاومتی و مقایسه آن قبل و پس از شکل‌دهی است. از آنجا که تیتانیوم خالص تجاری گرید ۲ برخلاف سایر گریدهای تیتانیوم مانند Ti-6Al-4V عناصر آلیاژی ندارد، آشکارسازی دانه‌بندی آن قبل و پس از شکل‌دهی مشکل بوده و این امر مستلزم انتخاب محلول اچ مناسب و مدت زمان مناسب برای خوردگی در مرز دانه‌ها می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر، با تحقیقات انجام شده این موارد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- مواد و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

تیتانیوم و آلیاژهای آن بطور عمده در دو حوزه کاربردی شامل موارد نیاز به مقاومت به خوردگی و سازه‌های سبک با استحکام بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. تیتانیوم یک عنصر آلوتروپی بوده و دارای ساختار بلوری شش‌وجهی فشرده در دمای اتاق و ساختار بلوری مکعبی مرکزپر در دمای ۸۸۸°C است. تیتانیوم با توجه به ساختار بلوری و فازهای موجود به سه دسته آلفا، بتا و آلفا-بتا تقسیم می‌شود. در این پژوهش از ورق‌های تیتانیومی خالص تجاری گرید ۲ با ضخامت ۰/۷ mm به عنوان بلانک اولیه استفاده شد که عناصر تشکیل دهنده و خواص مکانیکی آن که طبق استاندارد ASTM B265 بدست آمده در جدول‌های ۱ و ۲ مشخص شده است.

برای اعمال گرمایش مقاومتی از دو دستگاه ترانس و واریاک استفاده شده به گونه‌ای که با تغییر ولتاژ خروجی واریاک یا همان ورودی به ترانس، جریان خروجی از ترانس، بطور پیوسته تغییر کند. در ادامه برای گرم‌کاری به روش مقاومتی و برقراری

دانه‌بندی ماده و تغییر شکل آنها بدست آورد. برای متالوگرافی تمام نمونه‌ها اعم از خام و شکل داده شده، بر اساس استاندارد ASTM E3-17 مطابق شکل ۳ با مانت کردن و صیقل‌کاری، آماده‌سازی شده و برای اچ کردن نیز بر اساس استاندارد ASTM E 407-2015 از محلول ظاهرکننده Kroll استفاده شده است.

برای بررسی ریزساختار ماده، همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، در امتداد ضخامت ناحیه دیواره مخروطی یعنی در قسمتی از ماده است که تحت تنش‌های حرارتی و مکانیکی حاصل از نیروهای ابزار قرار گرفته و تغییر شکل داشته، نحوه تغییرات ریزساختار بررسی شده است.

جدول ۳ پارامترهای بررسی شده در انجام پژوهش

Table 3 Examined parameters in this research

پارامتر	مقدار
ضخامت ورق	۰/۷mm
شدت جریان	۵۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰A
نرخ باردهی	۲/۲۴mm/min

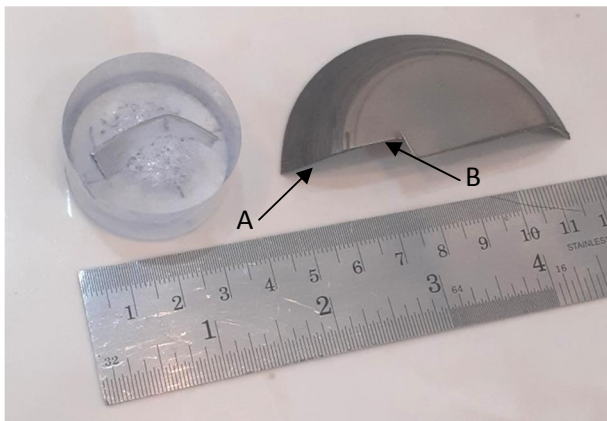


Fig. 3 Cutting parts and examined areas in microstructure analysis, A) part wall (main forming area), B) part bottom (heat affected area)

شکل ۳ برش قطعات و نواحی بررسی شده در تحلیل ریزساختار در امتداد ضخامت، (A) دیواره قطعه (ناحیه اصلی شکل‌دهی)، (B) کف قطعه (منطقه متأثر از حرارت)

### ۳- نتایج و بحث

همزمان با بررسی ریزساختار حاصل از شکل‌دهی قطعات مورد نظر، لازم بود تغییرات دمایی آنها نیز بررسی شود. از آنجا که تیتانیوم خالص تجاری دارای مقاومت الکتریکی بالا و رسانایی حرارتی پایین است ( $17 \frac{W}{m.k}$ ) [۱۳]، توزیع دما در ناحیه شکل‌دهی متمرکز بوده و بر اساس قانون ژول برای افزایش دمای مقاومت‌های اهمی ( $Q=RI^2t$ ) تعریف می‌گردد. اما از آنجا که اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ورق در حین شکل‌دهی دشوار بوده و دقت لازم را نخواهد داشت، دمای ناحیه تغییر شکل با

عدد سختی در مقیاس ویکرز بر اساس استاندارد ISO 6507-1(2018)، قبل و پس از شکل‌دهی با استفاده از دستگاه سختی‌سنج بررسی شد. ابتدا سختی ورق خام، قبل از شکل‌دهی و سپس سختی در امتداد دیواره و نیز کف قطعه پس از شکل‌دهی در شدت جریان‌های ۳۰۰A، ۴۰۰A و ۵۰۰A و هر کدام در سه نقطه و سپس با میانگین گرفتن بدست آمده است.

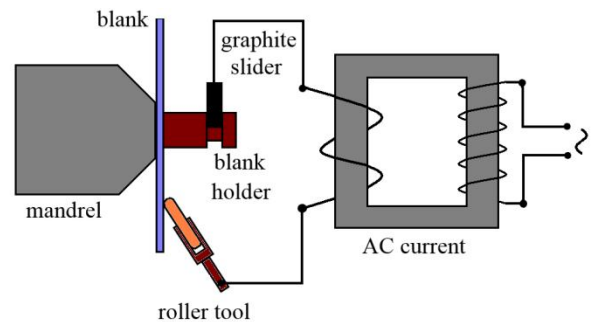


Fig. 1 The electrical circuit of the process and its components

شکل ۱ مدار الکتریکی فرآیند و اجزای آن

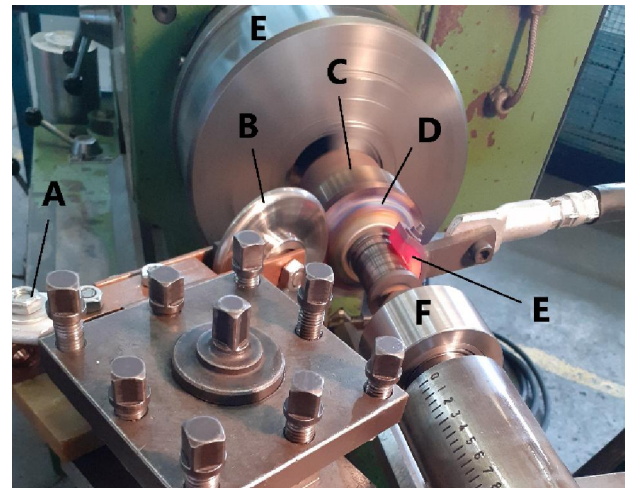


Fig. 2 Configuration of the tools and workpiece, A: Connecting the cable to the tool, B) Roller tool, C) Mandrel of the die, D) sheet under forming, E) Graphite slide, F) Holder of the bird side of the electric circuit of the process and its components

شکل ۲ پیکربندی ابزار و قطعه‌کار، (A) اتصال کابل به ابزار، (B) ابزار غلتکی، (C) ماندرب قالب (D) ورق در حال شکل‌دهی، (E) لغزنده گرافیتی، (F) نگهدارنده سمت مرغک مدار الکتریکی فرآیند و اجزای آن

به منظور بررسی فرآیند شکل‌دهی دورانی گرم مقاومتی ورق‌های تیتانیومی، پارامترهایی مطابق با جدول ۳ شامل ضخامت ورق، شدت جریان مصرفی و نرخ باردهی در نظر گرفته شد و آزمون‌های تجربی با سه بار تکرار انجام شدند.

تعیین دانه‌بندی دقیق، مستلزم انتخاب محلول مناسب و مدت زمان صحیح برای قرار گرفتن نمونه در محلول و در نهایت خوردگی قابل قبول مرزدانه بوده تا بتوان تصاویر مناسبی از

در حالت‌های مختلف جریان رخ نداده است. اما دیواره مخروطی، همزمان تحت نیروی شکل‌دهی و گرمکاری موضعی قرار گرفته است. لذا در ادامه، تحلیل ریزساختار ناحیه دیواره قطعات مورد بررسی قرار گرفت.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 5 Formed workpieces made by hot spinning with resistance in current intensity: a) 300 A, b) 400 A, c) 500 A

شکل ۵ قطعات ساخته شده با روش شکل‌دهی دورانی گرم مقاومتی در شدت جریان: الف) ۳۰۰ A، ب) ۴۰۰ A، ج) ۵۰۰ A

دماسنج مادون قرمز غیر تماسی اندازه‌گیری شد که با این کار، در شرایط استفاده از شدت جریان‌های ۳۰۰ A، ۴۰۰ A و ۵۰۰ A به ترتیب دماهای ۵۰۶°C، ۶۱۰°C و ۶۹۰°C در سطح قطعه در حین فرایند بدست آمد. این افزایش دما، در مقایسه با دمای تبلور مجدد تیتانیوم خالص که حدود ۵۵۰°C است [۱۳] در نمودار شکل ۴ نشان داده شده است.

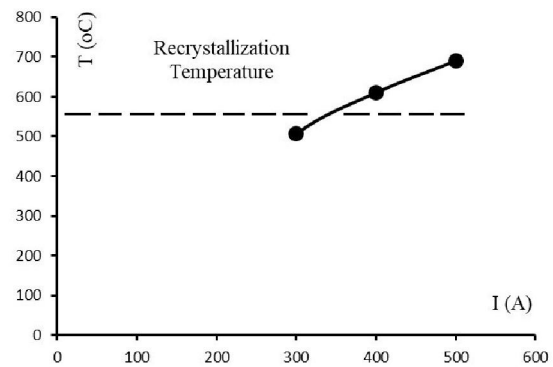


Fig. 4 The temperature of the deformation zone with changes in the current intensity and comparison with the recrystallization temperature of titanium current intensity: a) 300 A, b) 400 A, c) 500 A

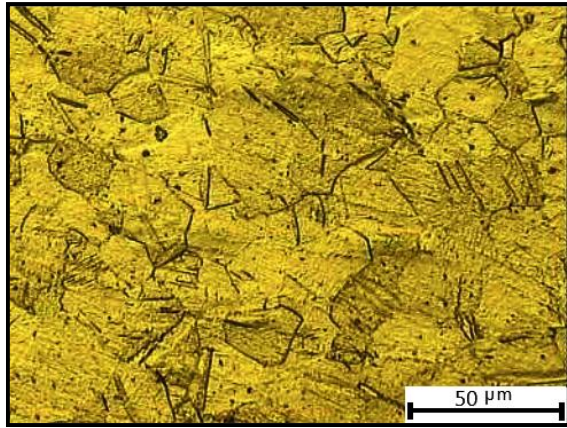
شکل ۴ دمای ناحیه تغییر شکل با تغییرات شدت جریان مصرفی و مقایسه با دمای تبلور مجدد تیتانیوم

بر اساس جدول ۲، قطعات شکل داده شده با روش شکل‌دهی دورانی گرم مقاومتی و با هندسه مخروط ناقص در سه مقدار جریان مصرفی در شکل ۵ نشان داده شده است. با مقایسه قطعات شکل داده شده ملاحظه می‌شود که در هر سه حالت جریان، قطعات شکل گرفته است اما با تغییر شدت جریان از ۳۰۰ A به ۵۰۰ A، سوختگی در لبه‌های قطعه دیده می‌شود.

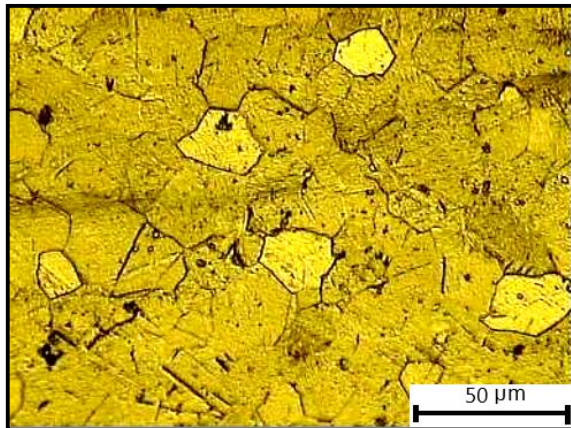
پس از شکل دادن قطعات، مطابق آنچه که در شکل ۳ نشان داده شد قطعات برش داده شدند و تصویربرداری از آنها جهت تعیین تغییرات ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری و بر اساس استاندارد ASTM E883-17 انجام شد. به جهت مقایسه با ماده خام، ریزساختار ماده خام نیز تعیین شد. شکل ۶ تصویر ساختار میکروسکوپی قطعه خام را نشان می‌دهد که شامل دانه‌های آلفا بوده و با محاسبه اندازه دانه بر اساس استاندارد ASTM E112-2013 متوسط عدد اندازه دانه برای آن ۶/۵ بوده است.

برای تحلیل دقیق‌تر با استفاده از نرم‌افزار ایمپج جی، مساحتی به اندازه  $0.24 \text{ mm}^2$  مطابق شکل ۷ برای حالت‌های مختلف جهت تعیین قطر متوسط دانه‌ها، متوسط مساحت دانه‌ها و تعداد دانه‌ها در واحد سطح انتخاب گردید.

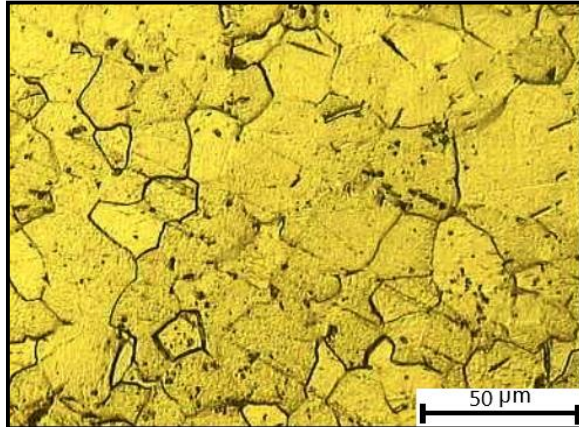
با بررسی ریزساختار به دست آمده از کف و دیواره قطعات شکل داده شده دیده شد که تغییر قابل ملاحظه‌ای در کف قطعه



(الف)



(ب)

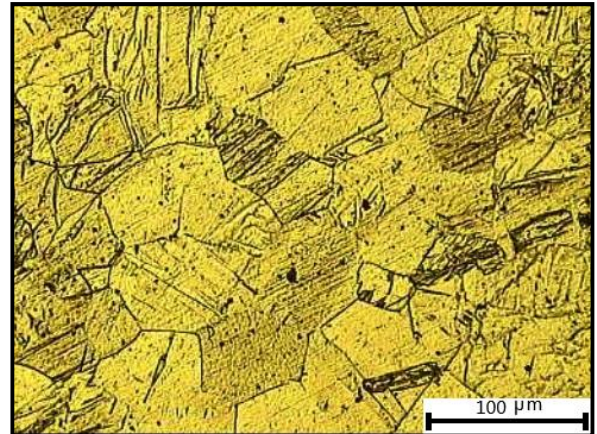


(ج)

**Fig. 8** The microstructure of the workpieces in three different current intensities on the conical wall; With 200X magnification, a) 300 A, b) 400 A, c) 500 A

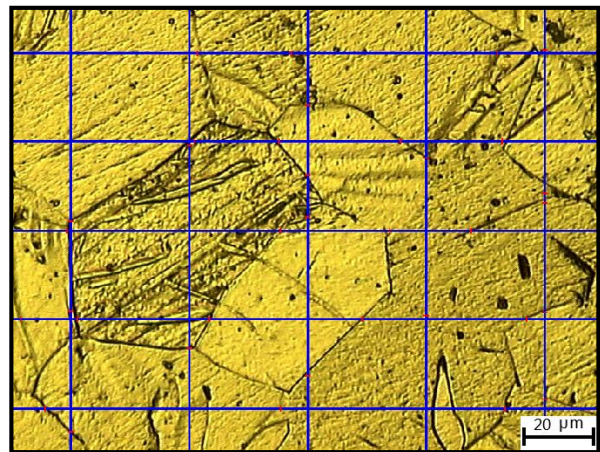
شکل ۸ ریزساختار قطعات شکل داده شده در سه شدت جریان مختلف در ناحیه دیواره مخروطی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، الف) ۳۰۰A، ب) ۴۰۰A، ج) ۵۰۰A

با مقایسه تعداد دانه به دست آمده برای قطعات خام و قطعات شکل داده شده در شدت جریان‌های ۳۰۰A، ۴۰۰A و ۵۰۰A نتایج دیده می‌شود که تعداد دانه در شکل‌دهی با شدت جریان ۳۰۰A به طرز قابل توجهی نسبت به ماده خام افزایش یافته است. مطابق شکل ۸-الف دیده می‌شود دانه‌ها هم محور



**Fig. 6** The image obtained from the microstructure of the material before spinning (as received material) with X100 magnification

شکل ۶ تصویر بدست آمده از دانه‌بندی ماده قبل از شکل‌دهی (قطعه خام) با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر



**Fig. 7** Sampling for grain size number analysis

شکل ۷ نمونه‌گیری برای آنالیز عدد اندازه دانه

شکل ۸ ریزساختار به دست آمده از دیواره مخروطی را برای شدت جریان‌های ۳۰۰A، ۴۰۰A و ۵۰۰A مطابق با شرایط جدول ۳ نشان می‌دهد. روند تغییرات متوسط و مساحت قطر دانه، تعداد دانه در واحد سطح و عدد اندازه دانه و مقایسه آنها با ماده خام در جدول ۴ آرایه شده است.

جدول ۴ مشخصات دانه‌بندی قطعات شکل داده شده در سه شدت جریان مختلف در ناحیه یک (دیواره مخروطی) و مقایسه با قطعه خام

**Table 4** Grain size characteristics of the parts formed in three different current intensities on the conical wall and comparison with as received material

پارامتر	قطعه خام	۳۰۰A	۴۰۰A	۵۰۰A
مساحت مورد بررسی (mm <sup>2</sup> )	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴
متوسط عدد اندازه دانه	۶/۵	۱۰/۵	۹	۸/۸
متوسط مساحت دانه (μm <sup>2</sup> )	۱۹۵۳	۱۰۹	۳۰۴	۳۴۴
متوسط قطر دانه (μm)	۴۴	۱۰	۱۷	۱۹
تعداد دانه در واحد سطح (mm <sup>2</sup> )	۵۱۲	۹۱۸۹	۳۲۸۷	۲۹۰۴

است. شکل ۱۲ تغییرات عدد اندازه دانه را در شدت جریان‌های بررسی شده نشان می‌دهد. با افزایش شدت جریان مصرفی در قسمت دیواره قطعه و درشت دانه شدن، عدد اندازه دانه طبق رابطه (۱) و بر اساس استاندارد ASTM E112-2013 بدست آمد.

$$N = 2^{n-1} \quad (1)$$

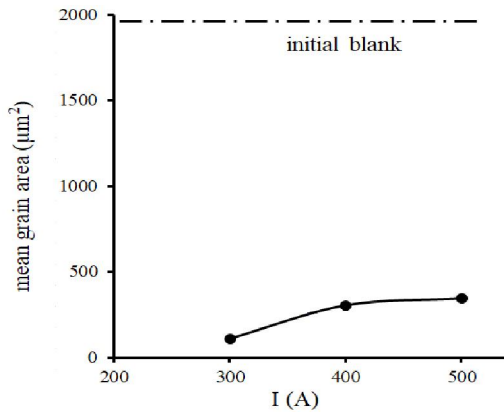


Fig. 9 Variation of the average grain area according to the intensity of different currents

شکل ۹ تغییرات متوسط مساحت دانه بر حسب شدت جریان‌های مختلف

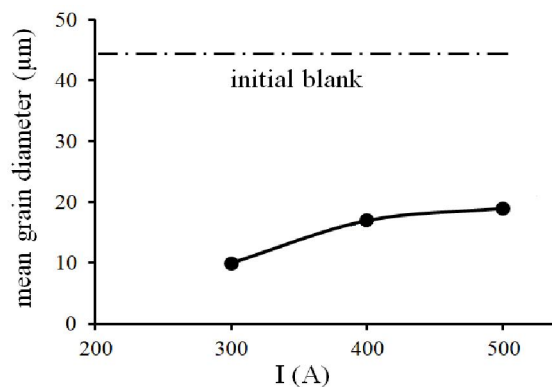


Fig. 10 Variation of the average grain diameter according to the intensity of different currents

شکل ۱۰ تغییرات متوسط قطر دانه بر حسب شدت جریان‌های مختلف

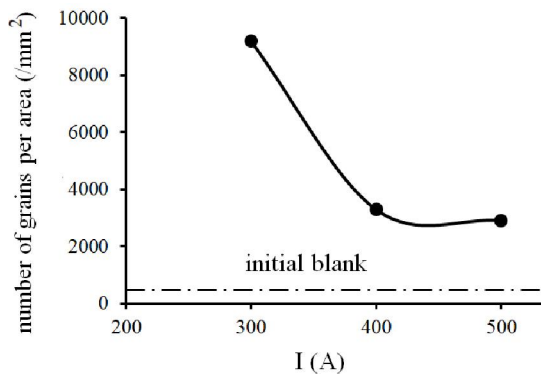


Fig. 11 Variation in the number of grains per unit area according to the intensity of different currents

شکل ۱۱ تغییرات تعداد دانه‌ها در واحد سطح بر حسب شدت جریان‌های مختلف

بوده و کشیدگی محسوسی در آنها مشاهده نشده است. علت کوچک بودن اندازه دانه در این حالت این است که پس از اتمام تبلور مجدد استاتیکی، چون دمای قطعه پایین بوده و سریع سرد شده است فرصت مرحله رشد دانه‌ها فراهم نبوده است.

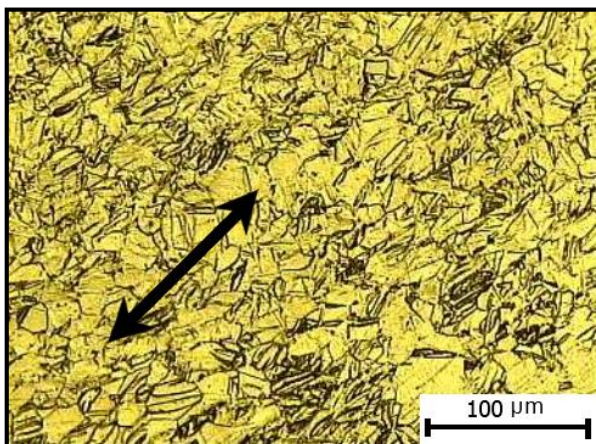
با افزایش شدت جریان از ۳۰۰A به ۴۰۰A و ۵۰۰A، همان‌گونه که در شکل‌های ۸-ب و ج دیده می‌شود، علاوه بر تغییر شکل مکانیکی، تبلور مجدد در دانه‌ها رخ داده است. با مقایسه تعداد دانه در شدت جریان‌های ۴۰۰A و ۵۰۰A نسبت به ماده خام، افزایش تعداد دانه دیده می‌شود اما در مقایسه با شدت جریان ۳۰۰A ملاحظه می‌شود که کاهش تعداد دانه رخ داده است و تعداد دانه در شدت جریان ۴۰۰A نسبت به ۵۰۰A کمتر به دست آمده است. این نتیجه، به این معنی است که با افزایش شدت جریان، دمای تغییر شکل هم افزایش یافته و در شدت جریان ۵۰۰A، ماده پس از اتمام تبلور مجدد فرصت بیشتری داشته که در دماهای بالاتر بماند و به این خاطر امکان بیشتری برای رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته فراهم شده که منجر به کاهش تعداد دانه و افزایش قطر دانه شده است.

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییرات متوسط مساحت و قطر دانه را در شدت جریان‌های مختلف نشان می‌دهد. با مقایسه قطر و مساحت دانه قطعات مختلف با ورق خام، اینگونه برمی‌آید که اولاً شکل‌دهی گرم مقاومتی سبب ریزدانه شدن ماده در قسمت دیواره قطعه نسبت به ورق خام اولیه می‌شود که علت آن، اعمال تنش‌های مکانیکی ابزار بر ورق بوده است. ثانیاً با افزایش جریان مصرفی و افزایش دمای قطعه، از ۳۰۰A تا ۵۰۰A، متوسط قطر دانه در قسمت دیواره افزایش یافته است. علت می‌تواند این باشد که در هر سه قطعه، نرخ باردهی و سرعت تغییر شکل مکانیکی یکسان و است، اما با توجه به نمودار شکل ۴ که بیانگر دمای موضع شکل‌دهی و مقایسه با دمای تبلور مجدد ماده است، با افزایش جریان از ۳۵۰ آمپر به بعد، ماده دچار تبلور مجدد دینامیکی شده و هر مقدر حرارت شکل‌دهی افزایش داده شده است، دانه‌های هم محور، بیشتر رشد کرده‌اند. بنابراین می‌توان بیان کرد که گرم‌کاری مقاومتی و تنش‌های مکانیکی وارده از سوی ابزار، در شدت جریان‌های بالا، اثرات معکوسی بر روی درشت‌دانی یا ریزدانی ماده دارند و با وجود اینکه افزایش شدت جریان مصرفی سبب درشت‌دانه شدن ماده می‌شود، اثر کار مکانیکی غلبه داشته و در مجموع در مقایسه با قطعه خام، ماده ریزدانه شده است.

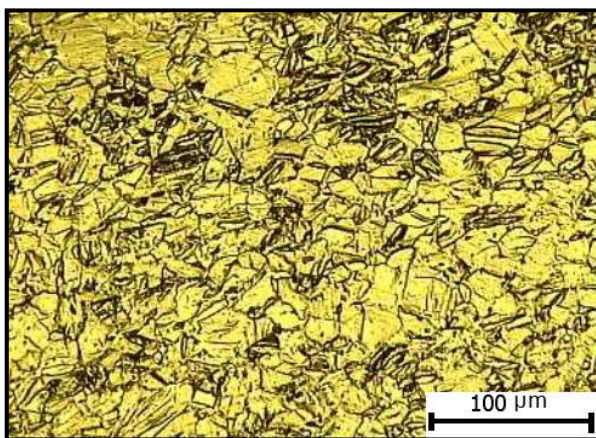
همان‌گونه که بیان شد بر اساس شکل ۱۱ با افزایش شدت جریان و دمای قطعه، تعداد دانه‌ها بر واحد سطح کاهش یافته



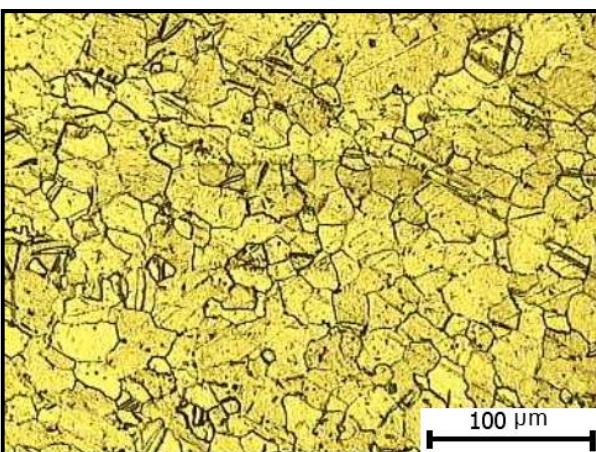
انجام شده و مطابق شکل ۴ تا نزدیک به دمای تبلور مجدد سبب گرم شدن آن می‌شود.



(الف)



(ب)

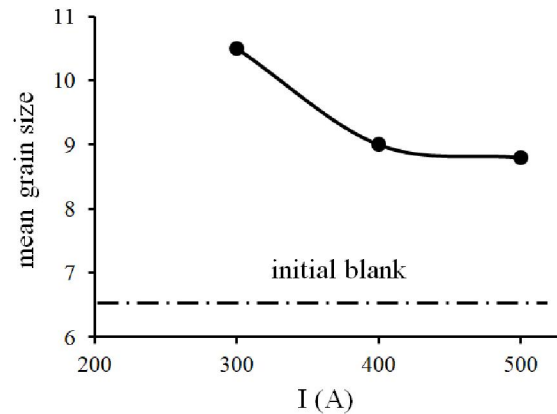


(ج)

**Fig. 13** Microstructure of the conical surface of the formed parts and arrangement of the grains, a) 300 A, b) 400 A, c) 500 A

شکل ۱۳ ریزساختار سطح مخروطی قطعات شکل داده شده و کشیدگی دانه‌ها، الف) ۳۰۰A، ب) ۴۰۰A، ج) ۵۰۰A

در بررسی نتایج شکل ۱۳ نیز کشیدگی دانه‌ها برای قطعاتی که با آمپرهای ۴۰۰A و ۵۰۰A که دمای شکل‌دهی آنها بالاتر از



**Fig. 12** Variation in the average number of grain size according to the intensity of different currents

شکل ۱۲ تغییرات متوسط عدد اندازه دانه بر حسب شدت جریان‌های مختلف

نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز موید این مطلب است که با افزایش شدت جریان و افزایش گرمای مقاومتی در قطعه، تعداد دانه کاهش یافته و به تبع آن، سایز دانه بزرگتر شده است. اما در حالت کلی، نسبت به دانه بندی ماده خام، تعداد دانه بر اثر کار مکانیکی افزایش داشته و حتی در صورتی که تبلور مجدد هم رخ داده، تأثیر کار مکانیکی در دمای بالا قابل ملاحظه است.

تصاویر نشان داده در شکل ۸ دانه‌بندی قطعات شکل داده شده در امتداد ضخامت قطعه را نشان داده است. در ادامه، برای بررسی کشیدگی دانه‌ها و تأثیر متقابل تنش‌های مکانیکی ابزار غلتکی و اثرات حرارتی بر آن، در امتداد سطح مخروطی قطعات شکل داده شده نیز آزمون متالوگرافی انجام شده و نتایج تغییر شکل دانه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۳-الف دیده می‌شود، در قطعه شکل داده شده با شدت جریان ۳۰۰A، کشیدگی دانه‌ها در امتداد نشان داده شده است. این اثر کشیدگی در شکل ۱۳-ب یعنی برای قطعه ۴۰۰A، کمتر و برای شکل ۱۳-ج یعنی قطعه ۵۰۰A، باز هم کمتر شده است. علت این امر می‌تواند این باشد که اگر دمای موضع شکل‌دهی بالا باشد، علی‌رغم تنش‌های مکانیکی ناشی از حرکت ابزار، بروز پدیده تبلور مجدد دینامیکی سبب تغییر شکل و رشد دانه شده و اثرات کشیدگی دانه‌ها کمتر شده است.

از آنجا که تیتانیوم خالص تجاری فاقد عناصر آلیاژی است، تصویر ریزساختار ماده قبل و پس از شکل‌دهی، تنها شامل فاز آلفا می‌باشد. اگر شکل‌دهی در حالت سرد انجام شود، دانه‌ها در جهت تنش‌های ناشی از ابزار غلتکی در جهت خاصی کشیده می‌شود، اما از آنجا که همزمان با اعمال تنش، گرمکاری موضعی

شد. اما در دیواره قطعات با افزایش شدت جریان، روند افزایش قطر متوسط دانه‌ها و درشت دانه شدن را به همراه داشته است. افزایش سختی می‌تواند ناشی از تنش‌های مکانیکی حاصل از نیروهای ابزار باشد که اثرات معکوس و غالب نسبت به درشت دانگی بر تغییر سختی قطعه داشته است.

برای هر کدام از قطعات شکل داده شده در شدت جریان‌های ۳۰۰A، ۴۰۰A و ۵۰۰A، سختی دیواره نسبت به کف قطعه مقدار بیشتری به دست آمده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر شدت جریان بر شکل‌دهی دورانی گرم تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از مقاومت ورق در برابر عبور جریان برق بررسی شده و تغییر در ریزساختار ماده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر ارائه شده است:

- با وجود اینکه گرمای حاصل از افزایش شدت جریان مصرفی سبب درشت دانه شدن ماده شده است، اما اثر کار مکانیکی نسبت به این گرمای ایجاد شده بر تغییر ریزساختار غلبه داشته و در مجموع، در همه حالت‌های شدت جریان بررسی شده در مقایسه با قطعه خام، ماده ریزدانه شده است.

- بالا رفتن شدت جریان در شکل‌دهی دورانی مقاومتی منجر به بروز پدیده‌ی تبلور مجدد دینامیکی شده که تغییر شکل و رشد دانه‌ها را در حین تغییر شکل به همراه داشته است. همچنین این پدیده باعث شده که علی‌رغم تنش‌های مکانیکی ناشی از حرکت ابزار، اثرات کشیدگی دانه‌ها برطرف گردد.

- نتایج به دست آمده از بررسی سختی ماده نشان داد که در فرایند شکل‌دهی دورانی مقاومتی، گرم‌کاری مقاومتی در تمام شدت جریان‌ها باعث افزایش سختی در مقیاس ویکرز نسبت به قطعه خام در قسمت دیواره قطعه شده و در کف قطعه ابتدا سختی نسبت به قطعه خام کمتر شده و با افزایش شدت جریان بیشتر شده است.

#### ۵- مراجع

- [1] F. Taghizadeh Rami, M. Elyasi, Improvement of rotary draw bending of commercial pure titanium tubes with resistance deformation and using steel ball, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 371-380, 2022.
- [2] M. Elyasi, F. Ahmadi Khatir, M. Hosseinzadeh, Experimental study of the die patterns in rubber pad forming process for producing of metallic bipolar plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15,

دمای تبلور مجدد بوده رخ نداده است. نتایج حاصل از بررسی ریزساختار در شدت جریان‌های مختلف نشان می‌دهد با افزایش شدت جریان مصرفی، نفوذ اتمی افزایش یافته و میزان تبلور مجدد فاز آلفا با افزایش میزان حرکت نابجایی‌ها بیشتر می‌شود. یکی از موارد قابل بررسی در مطالعه خواص مکانیکی قطعات شکل داده شده بررسی سختی آنها می‌باشد. برای این منظور، عدد سختی در مقیاس ویکرز، قبل و پس از شکل‌دهی با استفاده از دستگاه سختی‌سنج و بر اساس استاندارد ASTM E 92 (2018)/ISO 6507-1(2017) ملی (1387)-1(7810) بررسی شده است. ابتدا سختی ورق خام، قبل از شکل‌دهی و سپس سختی در امتداد دیواره و نیز کف قطعه پس از شکل‌دهی در شدت جریان‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ و ۵۰۰ آمپر و هر کدام در سه نقطه و سپس با میانگین گرفتن بدست آمده است. عدد ماکروسختی در شکل ۱۴ بصورت مقایسه بین سختی قطعه خام و قطعات شکل‌داده شده در شدت جریان‌های مختلف نشان داده شده است.

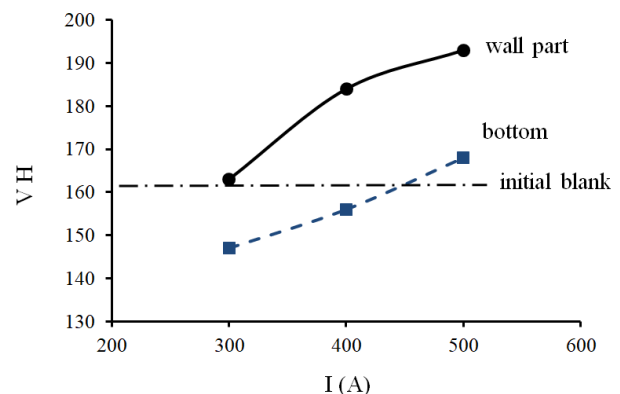


Fig. 14 Variation of material hardness in term of increasing current intensity

شکل ۱۴ تغییرات سختی ماده با افزایش شدت جریان مصرفی

همان‌گونه دیده می‌شود در تمام شدت جریان‌های مصرفی، سختی قطعه در امتداد دیواره مخروطی نسبت به ورق اولیه بیشتر شده و با افزایش شدت جریان و دمای موضع شکل‌دهی، افزایش یافته است. برای کف قطعه نیز وضعیت مشابهی از نظر افزایش سختی با افزایش جریان مصرفی و دمای قطعه رخ داده است. اما در مقایسه با سختی ورق اولیه، در صورتی که جریان مصرفی کمتر از ۴۵۰A آمپر باشد، سختی کف قطعه نسبت به ورق اولیه کمتر خواهد بود، با افزایش جریان از حدود ۴۵۰A که دمای معادل آن بر اساس نمودار شکل ۴ حدود ۵۵۰ درجه خواهد بود، سختی کف قطعه نسبت به حالت اولیه بیشتر خواهد

- [12] W. Homberg, D. Hornjak, C. Beerwald, Manufacturing of complex functional graded workpieces with the friction spinning process, *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, pp. 943-946, 2010.
- [13] Y. Chen, W. Xu, D. Shan, B. Guo, Microstructure evolution of TA15 titanium alloy during hot power spinning, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 2, pp. 323-327, 2011.
- [14] M. Zhan, Q. Wang, D. Han, H. Yang, Geometric precision and microstructure evolution of TA15 alloy by hot shear spinning, *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, Vol. 23, pp. 1617-1627, 2013.
- [15] G. Xiao, Q. Xia, X. Cheng, Y. Zhou, Research on the grain refinement method of cylindrical parts by power spinning, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 78, pp. 971-979, 2015.
- [16] G. Ambrogio, L. Filice, F. Gagliardi, Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming, *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 501-508, 2012.
- [17] L. Randovi, M. Nika, B. Jordov, Deformation behaviour and microstructure evolution of AlMg6Mn alloy during shear spinning, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 22, pp. 991-1000, 2012.
- [18] J. Yanagimoto, R. Izumi, Continuous electric resistance heating-Hot forming system for high-alloy metals with poor workability, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3060-3068, 2009.
- [19] J. Wang, X. Jin, K. Jin, W. Chen, J. Cai, Thickness reduction effects on the deformation mechanism and microscopic properties in electro-assisted pure titanium spinning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 103, pp. 4587-4595, 2019.
- [20] J. Hui, Z. Feng, W. Fan, X. Yuan, The influence of power spinning and annealing temperature on microstructures and properties of Cu-Sn alloy, *Materials Characterization*, Vol. 144, pp. 611-620, 2018.
- [21] X.X. Wang, M. Zhan, M.W. Fu, J. Guo, R.Q. Xu, X.P. Lei., A unique spinning method for grain refinement: repetitive shear spinning, *Procedia Engineering*, Vol. 207, pp. 1725-1730, 2017.
- No. 9, pp. 179-186, 2015.
- [3] H. Movahedinia, M.J. Mirnia, M. Elyasi, H. Baseri, An investigation on flaring process of thin-walled tubes using multistage single point incremental forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, No. 1, pp. 867-880, 2018.
- [4] M. Elyasi, M. Paluch, M. Hosseinzadeh, Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, No. 9, pp. 3307-3318, 2017.
- [5] M. Elyasi, An investigation on the parametric analysis of V-ring indenter mechanism in fine-blanking process, *Int. J. Mech. Appl.*, Vol. 3, No.4, pp. 76-80, 2013.
- [6] M. Elyasi, M. Ghafari, M. Bakhshi-Jooybari, The effects of shape and tool material on aluminum sheet spinning, *Key Engineering Materials*, Vol. 611, pp. 1116-1123, 2014.
- [7] W. Xu, D. Shan, Z. Wang, G. Yang, Y. Lu, D. Kang, Effect of spinning deformation on microstructure evolution and mechanical property of TA15 titanium alloy, *Trans. Nonferrous Met. SOC. China*, Vol. 17, pp. 1205-1211, 2007.
- [8] Y. Xiao, Y. Wu, W. Li, Z. Ma, R. Wang, Effects of shear spinning process on microstructures and mechanical properties of extruded pipes of spray deposited Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si alloy, *Materials Science*, Vol. 36, No.3, pp. 358-363, 2005.
- [9] K. Mori, M. Ishiguro, Y. Isomura, Hot shear spinning of cast aluminium alloy parts, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3621-3627, 2009.
- [10] P. Romero, N. Otero, J.M. Cabrera, D. Masague, Laser Assisted Conical Spin Forming of Dual Phase Automotive Steel. Experimental demonstration of Work Hardening Reduction and Forming Limit Extension, *Physics Procedia*, Vol. 5, pp. 215-225, 2010.
- [11] D. Han, H. Yang, L.W. Zhang, S.Z. Mou, Y.T. Yang and X.X. He., Effects of heat treatment and spinning temperature on microstructure and properties of 3A21 aluminium alloy, *Journal of Solid Rocket Technology*, Vol. 33, No. 2, pp. 225-228, 2010.