



بهینه‌سازی فرآیند تشکیل فشار گاز داغ برای جزء آلیاژ تیتانیوم

هنگی زی 3 جینگ وی 102 جی ژای 102 و باند لیو 212 3.1 Kehuan Wang بای و کو 210 لینگ وانگ 2

2023 ژانویه 28 :آنلاین انتشار 2023 / ژانویه 19 :پذیرش 2022 / اوت 26: دریافت

Springer Nature 2023 بخشی از Springer-Verlag France SAS، نویسندگان، تحت مجوز انحصاری ©

خلاصه

از آلایز تیتانیوم جزء لوله ای با پروفیل نامنظم با استفاده از لوله جوش داده شده با لیزر توسط هر دو شبیه (HGPf) در این مقاله، شکل دهی فشار گاز داغ تحت شرایط مختلف برای تعیین منحنی های تنش- کرنش واقعی (BM) سازی و آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش های کششی تک محوری فلز پایه بهینه سازی شد. نتایج نشان می دهد که فشار شکل دهی با کاهش دما و (RSM) انجام شد. فرآیند شکل دهی با شبیه سازی اجزای محدود و روش سطح پاسخ به دما، کرنش و نرخ کرنش حساس هستند. از چروک شدن و نازک شدن موضعی جزء می توان با BM افزایش نرخ کرنش افزایش می یابد. ریزساختارهای باید موقعیت ایده آل جوش تعیین شود. یک جزء آلایز (WS) قطر لوله اولیه معقول در طول شکل دهی جلوگیری کرد. برای جلوگیری از شکست درز جوش با استفاده از پارامترهای شکل دهی بهینه تشکیل شد. کل HGPf واجد شرایط با دقت ابعادی بالا و خواص پس از شکل خوب با موفقیت توسط TC2 تیتانیوم زمان گرم شدن و شکل دهی، لوله کمتر از 30 دقیقه بود. هر دو ویژگی پس از شکل و ریزساختار جزء تقریباً با مواد اولیه یکسان بود.

داغ گاز فشار تشکیل . محدود اجزای تحلیل و تجزیه . پاسخ سطح روش . خواص و ریز ساختار . نیتایوم هالیاژ کلیدواژه

معرفی

کارایی، هزینه بالا و خواص زوال [3]، 6. همچنین تشکیل اجزای لوله‌ای معمولی، بسیار دشوار است SPF و HP دیواره نازک توسط فرآورده‌های

برای بهبود کارایی تولید و اطمینان از خواص پس از شکل گیری، فرآیند برای شکل دهی یکپارچه جزء آلایژ تیتانیوم بر اساس فرآیند HGPF هیدروفرمینگ لوله توسعه داده شد. [7] که دمای شکل دهی کمتری دارد اما دارد. با این حال، شرایط شکل دهی SPF سرعت شکل دهی بالاتری نسبت به به دلیل استحکام نسبتاً بالا، چالش های جدیدی را برای آلایژ های HGPF تیتانیوم به همراه دارد. پارامترهای فرآیند منطقی مانند مقدار فشار و دمای HGPF شکل دهی، کلید ساخت اجزای آلایژ تیتانیوم پیچیده شکل توسط هستند. در حال حاضر، تحقیقات عمدتاً بر روی تأثیر پارامترهای فرآیند بر سرعت نازک شدن، کنترل عیب تمرکز دارند. [8، 9] و تشکیل حد [10، 11] مسیر بارگذاری فشار بر شعاع گوشه لوله با قطر متغیر تأثیر می گذارد. شعاع گوشه به صورت خطی در طول زمان در مرحله فشار تغییر می کند، اما در طول زمان در مرحله فشار ثابت به طور نمایی تغییر می کند. [12] متوسط نسبت نازک شدن ناحیه برآمدگی را می توان به طور قابل توجهی کاهش داد و توزیع ضخامت قطعه کار با افزایش تغذیه محوری یکنواخت تر بود. [13، 14]

از شده ساخته نامنظم های پروفیل با نازک دیواره ای اجزای لوله
آلیاژهای تیتانیوم نه تنها خواص عالی دارند، بلکه مزیت ساختاری
صرفه جویی در مواد و کاهش وزن را نیز نشان می دهند. با این ح
تیتانیوم دارای مقاومت در برابر تغییر شکل بالا، انعطاف پذیری ض
2 بنابرین،]، برگشت فتری بزرگ در طول تشکیل در دمای اتاق
و (HP) فرآیندهای شکل دهی گرم توسعه یافته اند: مانند پرس گرم
SPF و HP فرآیندهای مرسوم 5]، (SPF) [تشکیل سوپر پلاست
هستند کم های کاسته دارای

* کیهوان وانگ

kehuanhit@163.com

- 1 آزمایشگاه ملی کلید برای پردازش گرم دقیق فلزات، موسسه فناوری هاربین، هاربین 150001، چین
- 2 موسسه شکل دهی سیالات فشار بالا، موسسه فناوری هاربین، هاربین 150001، چین
- 3 مرکز فناوری مهندسی، شرکت هواپیماسازی شنیانگ، شنیانگ 110850، چین

غیر همدم در HGPF علاوه بر این، لیو و همکاران [15] [تشکیل با اختلاف مقطع زیاد را مورد مطالعه قرارداد. پل TA18 قطعات آلیاژ تیتانیوم و همکاران [16] [آزمایش شکل دهی جزء آگزوز تیتانیوم درجه 2 را انجام داد از -0.07 تا 0.11 CAD و انحرافات ابعادی بین قطعه شکل گرفته و مرجع میلی متر است. در حال حاضر، روش مورد استفاده برای تعیین پنجره فرآیند، است. [7، 9، 17، 18] HGPF محاسبه حداقل فشار برآمدگی و شبیه سازی در با این حال، پنجره فرآیند تعیین شده توسط این روش ممکن است بهترین گزینه نباشد. بنابراین، در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای فرآیند بر دقت ابعادی و از اهمیت بالایی HGPF یکنواختی ضخامت هنگام تعیین پنجره فرآیند که در ابتدا توسط پاکس و (RSM) برخوردار است. روش سطح پاسخ ویلسون معرفی شد [19]، که به طور گسترده در شکل دهی فلز برای پیش بینی متغیرهای پاسخ خروجی مانند نیروی باینر، شعاع فیله پانچ، ضریب اصطکاک و غیره استفاده می‌شود. [20، 21] با این حال، بهینه سازی پنجره به ندرت گزارش شده است. علاوه بر این، RSM با روش HGPF فرآیند V Ti- شامل آلیاژ HGPF 2.5- آلیاژهای تیتانیوم گزارش شده در مطالعه آلیاژ [55- 23] [Ti-22Al-24Nb-0.5Mo می باشد. [5]، آلیاژ [22] 3Al HGPF، با این حال CP-Ti و آلیاژ [25] [TA15 آلیاژ تیتانیوم [24] Ti، به ندرت گزارش شده است. بنابراین، توسعه یک روش TC2 آلیاژ تیتانیوم جزء آلیاژ HGPF بهینه سازی برای تعیین بهترین پنجره فرآیند برای ضروری است TC2 تیتانیوم

HGPF در این مقاله، روش جدیدی برای تعیین پنجره فرآیند برای پیشنهاد شده است. متفاوت از روش های سنتی، این روش می یکنواختی ضخامت و ابعادی دقت گرفتن نظر در با را فرآیند توان پارامترهای آلیاژ ریز ساختار تکامل محوری و تک کششی رفتار. کند بهینه همزمان طور به گرفت قرار مطالعه مورد شرایط مختلف تحت بالا دمای در TC2 تیتانیوم سپس

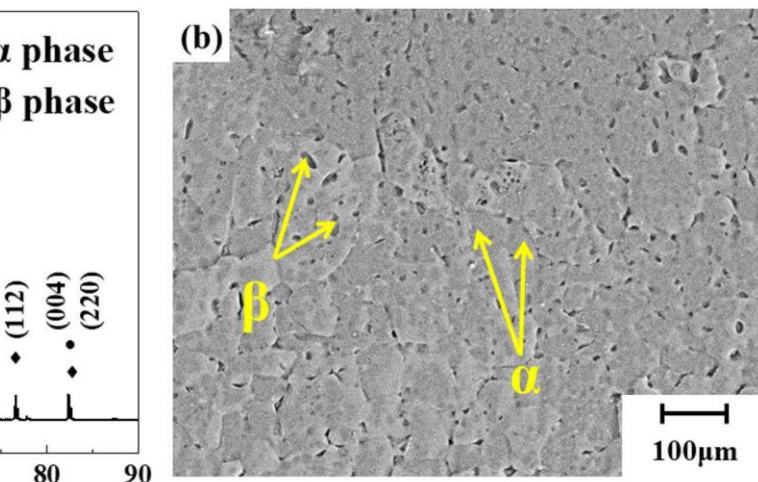
سازی شد بهینه RSM و محدود امان تحلیل از استفاده با دهی فرآیند شکل علاوه بر این، انتخاب موقعیت جوش نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در با پروفایل های نامنظم برای TC2 نهایت، یک جزء لوله ای آلیاژ تیتانیوم تأیید پنجره فرآیند تشکیل شد. با ترکیب با توصیف خواص و تکامل آلیاژهای تیتانیوم را می توان HGPF ریز ساختار، بهترین پنجره فرآیند برای برای اطمینان از دقت ابعادی، یکنواختی ضخامت و خواص پس از شکل قطعه آورد بدست موثر طور به تشکیل شده

ها روش مواد

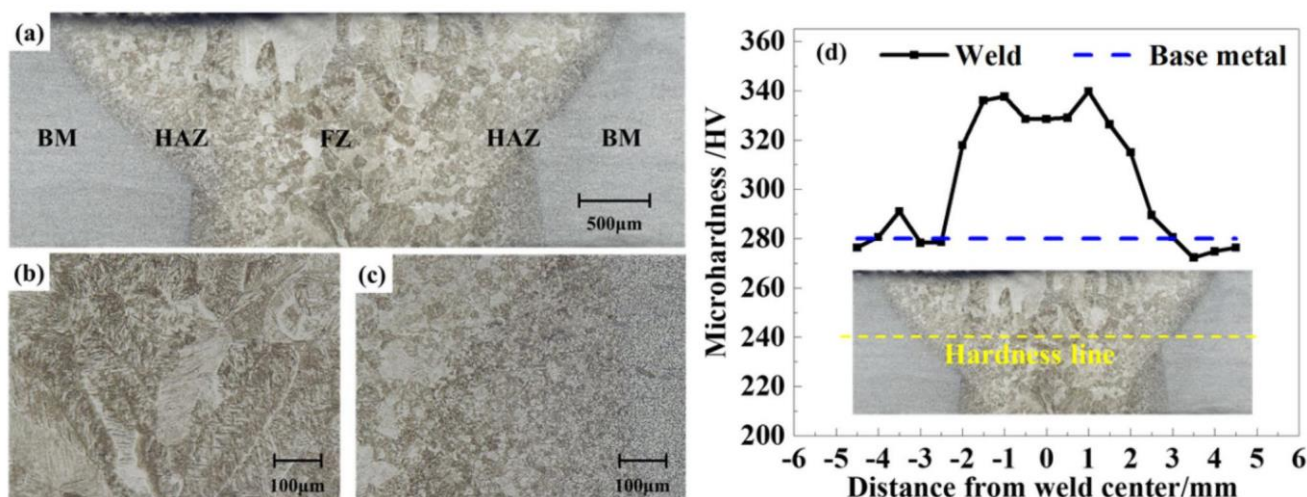
مواد

و (Ti-4Al-1.5Mn) TC2 تیتانیوم آلیاژ ورق یک ماده دریافتی صفحه اولیه را XRD الگوی ضخامت متوسط آن 1.8 میلی متر است. شکل 1 نشان می دهد. همانطور که از مقدار پیک مشاهده می شود، ورق اصلی از شده داده نشان شکل در ریز ساختار اولیه. است شده تشکیل α و β فازهای در عمدتاً β فاز. است α فاز روشن فاز و β فاز تاریک فاز 1b. است اندازه دو هر. هستند α های دانه در اقلیت شود می توزیع دانه مرزهای آلیاژ ورق. هستند α فاز از کوچکتر بسیار β حجمی فاز کسر و متوسط لوله یک در سپس و شد داده برش شده طراحی اندازه مطابق با TC2 تیتانیوم جوش LBW توسط سپس و شد نورد سانتیگراد درجه 650 دمای در متر بر 2/1 و وات کیلو 2/1 ترتیب به جوش سرعت و لیزر توان داده شد بود دقیقه

لیزری جوشکاری از پس TC2 تیتانیوم آلیاژ ریز ساختار 2a شکل و (FZ) منطقه همجوشی، (BM) است. سه منطقه وجود دارد: فلز پایه نشان می را FZ در ریز ساختار 2b شکل (HAZ). حرارت از متاثر منطقه ساختار است شده تشکیل ریز α با درشت ستونی های دانه از که دهد یک شامل HAZ ریز ساختار ماتریس در مارتنزیتی



TC2 آلیاژی ورق اولیه ریز ساختار (ب) TC2. آلیاژ XRD الگوهای (ا). اولیه ورق ریز ساختار و XRD الگوی 1. عکس



ویکرز میکروسختی توزیع (د) HAZ. ریزساختار (ج) FZ؛ ریزساختار (ب) LBW. مفصل ریزساختار (آ) ریزسختی و جوش ریزساختار 2 شکل

تبدیل شده، همانطور که β فاز β اولیه، فاز α فاز، α مخلوطی از میکروسختی تست دستگاه از 2c. است شده نشان در شکل 15 زمان مدت و کیلوگرم 0.5 بار با سختی گیری اندازه ویکری برای 2d. است شده داده نشان شکل در ریزسختی. شد ثانیه استفاده 328.5 ~ جوش مرکز ناحیه در سختی مقادیر که شود مشاهده می 291.1 ~ ترتیب به BM و HAZ در سختی مقادیر. است HV339.7 از بیشتر جوش استحکام. است 272.3 ~ 291.1 HV و 328.5 HV است. است فلز پایه

داغ محوری تک ریزساختاری و تست کششی

برای مختلف شرایط تحت محوری تک های کششی آزمایش شد اجرا TC2 تیتانیوم آلیاژ کرنش و جریان تنش بین مطالعات رابطه کرنش نرخ محدوده و سانتیگراد درجه 900 تا 750 از محدوده دما ترتیب به نمونه عرض و گیج طول 1. است ثانیه 0.1 تا 0.001 از تکرار بار سه آزمایشات تمام. است متر میلی 5 و متر میلی 15 رویشی الکترونی میکروسکوپ توسط ریزساختارها شد بررسی (OM) نوری میکروسکوپ و (SEM) Zeiss Supra55 اسید درصد 6 محلول با پولیشینگ الکترو روش به ها نمونه شدند. کلریک، 34 درصد بوتانول و 60 درصد تهیه شدند

و ولت 25 پتانسیل با گراد سانتی درجه 40- دمای در (vol%) متانول با شده صیقلی های نمونه سپس. ثانیه 52 زمان با آمپر 0.7 جریان استفاده از مخلوطی از اسید نیتریک 13 درصد، اسید هیدروفلوریک 7 شدند اچ ثانیه 10 زمان با (درصد حجم) آب درصد 80 درصد

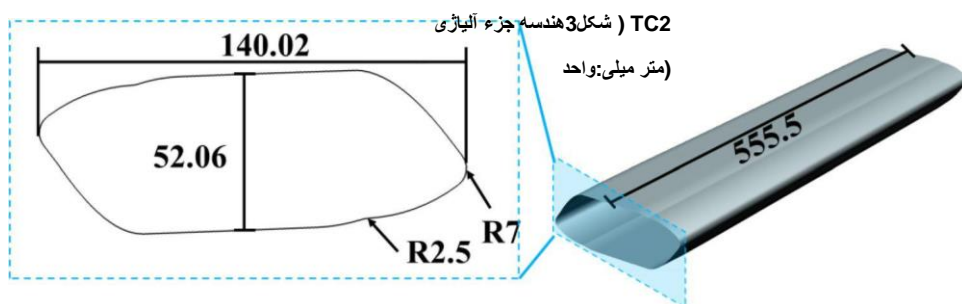
HGPF محدود مدل المان

با پروفایل های نامنظم تشکیل شد TC2 یک جزء لوله ای آلیاژی متر میلی 555.5 قطعه کل طول. است قطعه دقیق ابعاد 3 شکل 52 و متر میلی 140 حدود ترتیب به بخش عرض و طول. است

است متر میلی 7 محلی فیله شعاع. است میلی متر

کنترل تأثیر تحت شده داده جوش TC2 آلیاژی لوله شکل پذیری فرایند، مانند دمای شکل گیری، کرنش و نرخ فشار قرار می گیرد. با این حال، دقت ضخامت قطعه تشکیل شده عمدتاً توسط قطر عیوب کنترل برای. شد می کنترل جوش موقعیت و لوله اولیه نازک شدن، چروک شدن و چشمک زدن موضعی، از نرم افزار مورد لوله. شد استفاده عددی سازی شبیه برای Abaqus تجاری فرایند در و دارد طول متر میلی 555.5 مقاله این استفاده در تغذیه محوری وجود ندارد. بنابراین، لوله به عنوان یک HGPF نظر در دوبعدی صفحه کرنش مدل یک و صفحه حالت کرنش

گرفته شد



سیستم‌های مانیپولینگ دما علاوه بر این، شامل قالب‌های قالب پانچ‌های مهر و موم، ترموکوپل‌ها، ورودی گاز و کوئل‌های القایی نیز می‌شود. در حین شکل‌دهی، قالب‌های شکل‌دهی ابتدا با و شوند می‌گرم نظر مورد دمای تا القایی‌های پیچ سیم استفاده از سه از لوله دمای تشخیص برای گیرد می‌قرار قالب در سپس لوله تا دقیقه 10 مدت به نگهداری از پس لوله شد ترموکوپل استفاده 5 از کمتر ترموکوپل سه دمای اختلاف و شد گرم نظر دمای مورد بود. °C، که یکنواختی دمای لوله را ثابت کرد. پانچ‌ها برای مهر و آگون سپس و شدند وارد هدف‌های موقعیت به لوله موم‌شدن طبق مسیر بارگذاری مشخص به داخل لوله پمپ شد. این جزء از

شد خنک اتاق دمای تا هوا و شد خارج قالب‌ها

موقعیت یک انتخاب با شد استفاده سازی شبیه در 4 در شکل جوش مناسب، می‌توان از تغییر شکل بزرگ جوش جلوگیری کرد علاوه بر این، ناحیه جوش نسبت بسیار کمی را در مقایسه با سطح مواد پایه اشغال می‌کند. بنابراین، در طول شبیه سازی، جوش به بخش در جوش موقعیت انتخاب نشد سازی مدل طور جداگانه در محدود المان تحلیل پارامترهای گرفت قرار بحث بعدی مورد جدول ارائه شده است 1 مانند مراحل آنالیز، اندازه مش و شرایط های منحنی شد اتخاذ مقاله این در Mises بازده معیار مرزی با آمده دست به TC2 تیناتیوم آلیاژ واقعی کرنش-تنش توصیف برای سازی شبیه در داغ محوری تک‌های کششی آزمایش

شد استفاده مواد رفتار جریان

داغ گاز تشکیل فشار

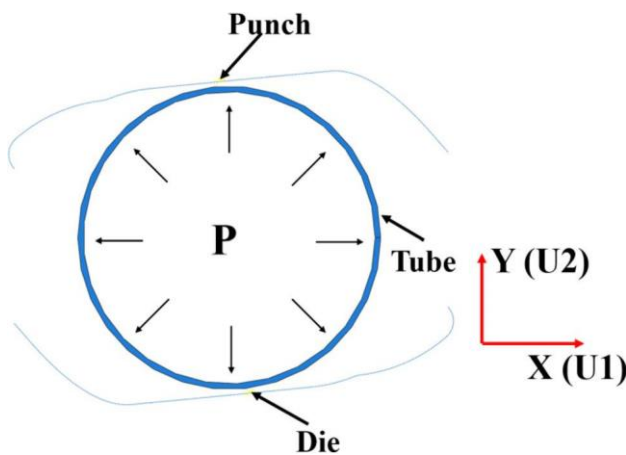
داده نشان شکل در مربوطه های سیستم و دهی تجهیزا شکل شامل سیستم فشار گاز، سیستم کنترل HGPf شده است. 5 سیستم های فشار گاز، سیستم خنک کننده آب، گرمایش و

بحث نتایج و

تکامل و داغ محوری تک تست کششی

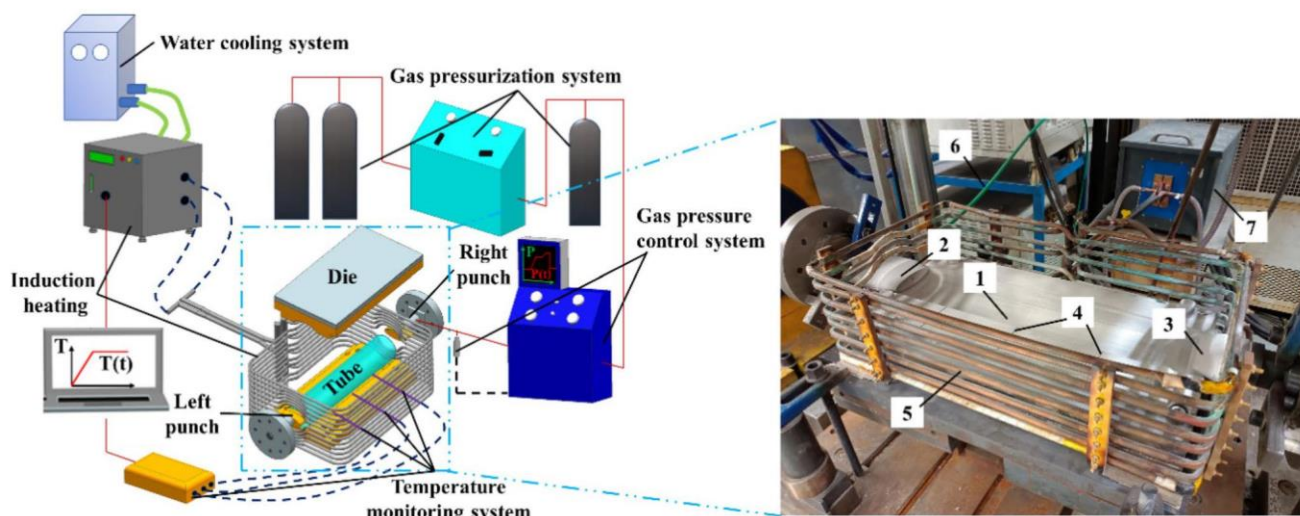
ریز ساختار

دست آوردن به برای مختلف شرایط تحت داغ محوری تک آزمایش کشش در شکل نشان BM خواص مواد انجام شد. منحنی های تنش-کرنش واقعی از آنجایی که حداکثر کرنش واقعی قسمت تشکیل دهنده a-c داده شده است. 6 کمتر از 0.3 است، آزمایش کشش تک محوری داغ متوقف شد زیرا کرنش رسید. تنش با کاهش دما و افزایش نرخ کرنش افزایش BM0.6 واقعی به یافت. در دمای پایین و نرخ کرنش بالا، رفتار سخت شدن عمدتاً ناشی از افزایش کرنش و نرخ کرنش است و دلیل اصلی نرم شدن، رفتارگر دنی است. در دمای بالا و سرعت کرنش کم، رشد دانه منجر به سخت شدن می‌شود. دلیل اصلی نرم شدن باز یابی دینامیکی، تبلور مجدد دینامیک و تبدیل فاز است. هنگامی که درجه حرارت بالاتر از 750 درجه سانتیگراد است، از دیاد طول

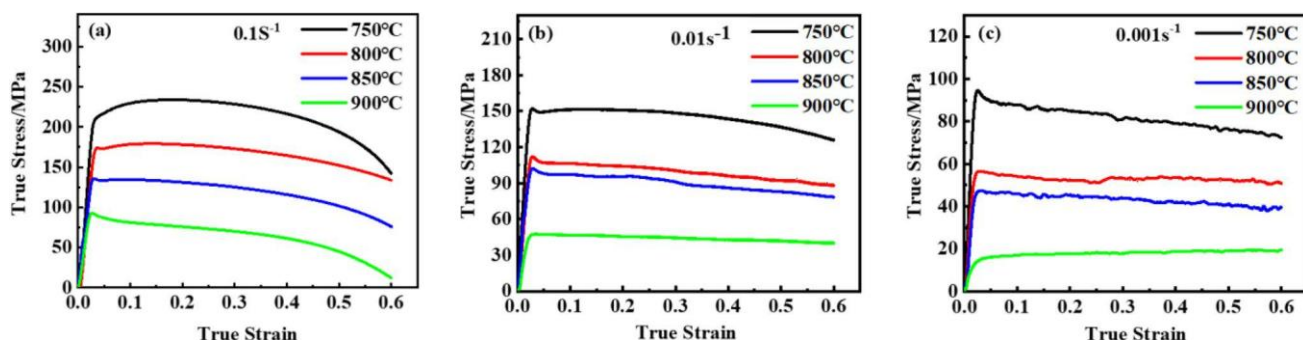


HGPf محدود مدل المان شکل

پروژه	بعدی مدل دو
قسمت اولیه لوله اندازه نسبت انبساط (بالایی قسمت قالب و لوله)	بدنه 0.3، 4، 5، 6٪
مش نوع پانچ و قالب نوع توری	گسیخته سخت و سفت
لوله	R2D2 (جامد همگن) شکل قابل تغییر
اندازه مش	CPE4R
لوله ویژگی مواد	متر میلی 0.3
گام	6 شکل در شده داده نشان پلیاستیک الاستیکو
مخاطب	دینامیک 3 متر میلی بر کیلوگرم 4.5E-9 چگالی واضح است
شرایط مرزی	است 0.1 Die تماس پتانسی، لغزش محدود و ضریب اصطکاک
شده تعریف پیش فیلد	(U1=U2=UR3=0)
سرعت بالا	(متر میلی -50) U2 قسمت بالایی
	ثانیه بر متر میلی 5 گراد سانتی درجه 900 تا 800 از لوله محدود دمای
	است



که در آن 1 در حال تشکیل قالب، 2 پانچ چپ، 3 پانچ سمت راست، 4 ترموکوپل، 5 سیم پیچ القایی، 6 ورودی گاز و 7 تجهیز اتگرمایشی TC2، از آلیاژ HGF شکل 5 دستگاه های است.



1-ثانیه 0.001 (ج)، 0.01 (ب)، 0.1 (ا) ثانیه. واقعی کرنش-تنش های منحنی 6 شکل

بزرگترین اجزا گوشه حداقل تشکیل برای نیاز مورد گاز فشار [HGF، است که طبق فرمول موجود در مرجع محاسبه می شود کشیدگی دارای که است 0.6 از بالاتر HGF فرآیند طی در است. در 800 درجه سانتیگراد 0.001 / ثانیه، فشار BM کافی برای [17. / سانتیگراد درجه 800 عنوان به، است مگاپاسکال 15 شکل دهی ثانیه، فشار شکل دهی بالاتر از 30 مگاپاسکال است 0.01 راندمان را می توان از طریق نرخ کرنش بالا بهبود بخشید، اما نیاز باید می افزایش نیز به تجهیزات

محوری تک کشش آزمایش از پس TC2 تیتانیوم آلیاژ ریز ساختار 7 شکل ابتدا دانه اندازه 1- است ثانیه 0.01 کرنش نرخ که هنگامی داغ است می کاهش سانتیگراد درجه 900 به 800 از دما با سپس و افزایش یافته دلیل این به این 7 a-c است شده داده نشان شکل در که باید همانطور 850 دما که هنگامی است داده رخ (DRX) دینامیکی مجدد تبلور است که درجه سانتیگراد است، اندازه دانه با نرخ کرنش از 0.001 به 0.1 ثانیه رشد 7d-f است شده داده نشان شکل در که همانطور 1- باید کاهش می درجه 850 دمای در ها حفرة مدت طولانی بالا دمای دلیل به اندازه دانه سانتیگراد درجه 900 در α ثانویه فاز 1- شدند ظاهر ثانیه 0.1 سانتیگراد در شد می پذیری انعطاف کاهش اما بالا استحکام به منجر که رسوب کرد

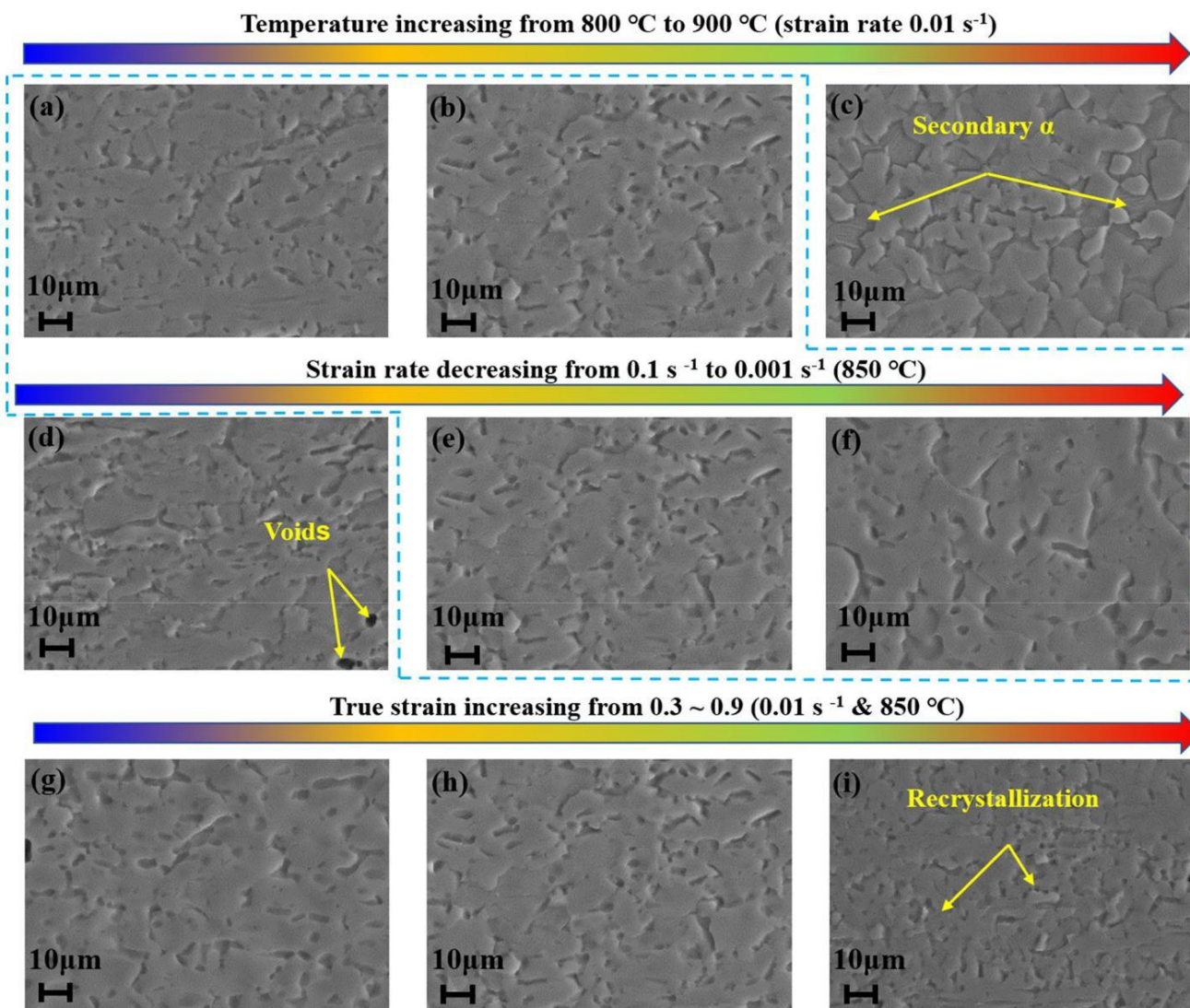
یافت کاهش کرنش افزایش با اندازه دانه

7 است شده داده نشان شکل در که همانطور DRX وقوع به دلیل عامل دو فاز تبدیل و DRX که کرد مشاهده توان می. من - گرم ریز ساختار حفظ برای هستند ریز ساختار تکامل دهنده اصلی تغییر اولیه مواد پس از شکل گیری، دمای شکل دهی باید در 800-850 شود کنترل درجه سانتیگراد

اولیه لوله تعیین قطر

برای تعیین قطر اولیه منطقی لوله، تجزیه و تحلیل اجزای محدود برای لوله اولیه با نسبت انبساط 0، 3، 4، 5 درصد و 6 درصد انجام شد. هنگامی که نسبت انبساط لوله 0% باشد همانطور که در شکل به قالب شدن بسته حین در لوله 8 الف است شده نشان داده وجود HGF در مرده های چروک و چین و ریخت فرو طوری با لوله برای مشابهی خطر ندارند جریان فضای مواد دارند زیرا است شده داده نشان شکل در که همانطور 3% نسبت انبساط بنابراین، در فرآیند بسته شدن قالب، لوله ای با b وجود دارد 8 بیشتر تعیین برای شود می توصیه درصد 6 تا 4 نسبت انبساط

نسبت انبساط



من (g) - (سویه واقعی متفاوت، f) - آ(-) ج،) نرخ کرنش متفاوت (د) SEM نمونه های BM شکل (7) پس از تغییر شکل کششی، دمای مختلف

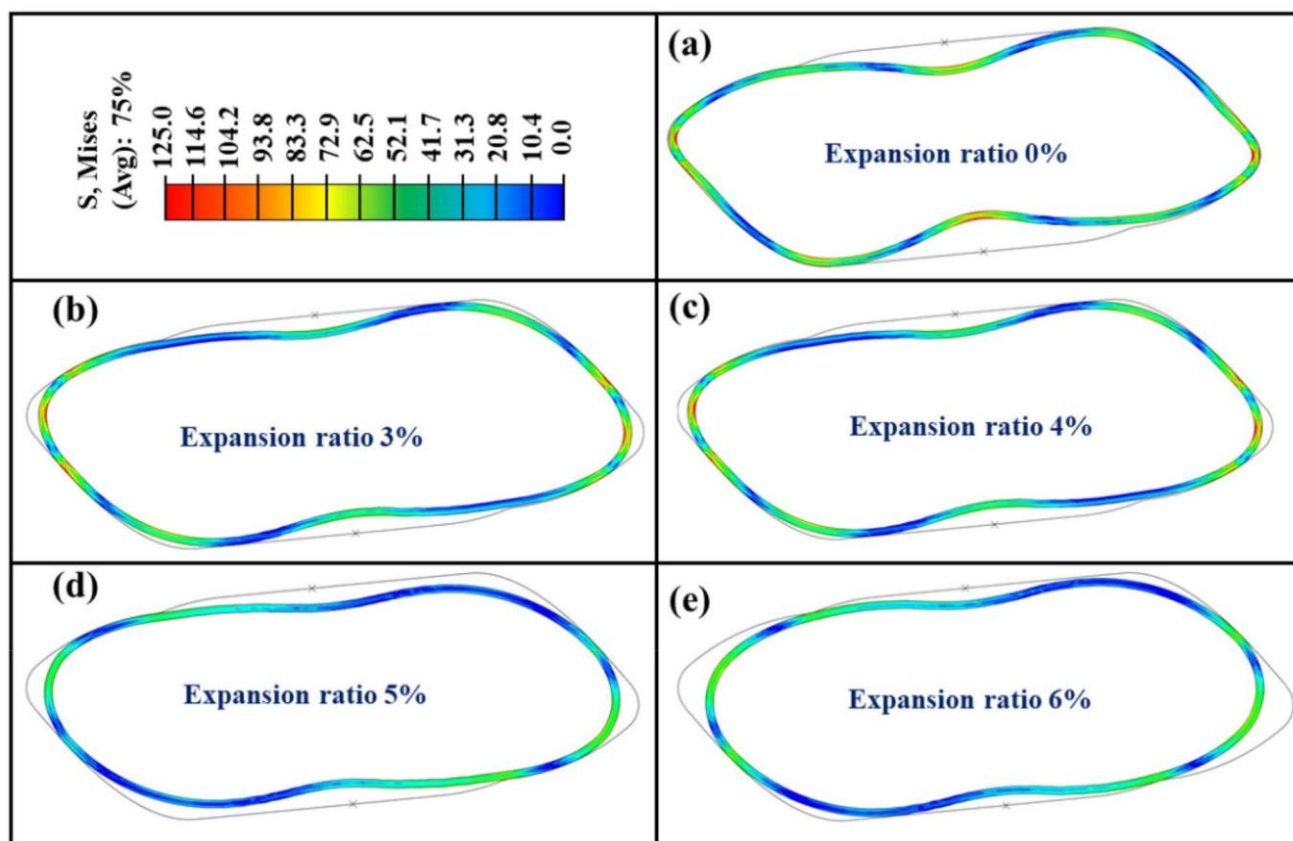
در لوله اولیه، پیش بینی ضخامت جزء با نسبت های مختلف گرفت خواهد قرار بحث مورد انبساط بعدا توزیع یافت افزایش انبساط نسبت افزایش با شدن نرخ نازک شده داده نشان شکل در انبساط مختلف های ضخامت نسبت شده داده نشان شکل در ضخامت گیری اندازه نقاط 9. است انتخاب محیط امتداد در مساوی طور به نقطه 9a. 28. است شدند. حداقل ضخامت جزء با نرخ های انبساط مختلف در شکل نسبت با لوله شدن نازک میزان اگرچه 9b. است شده نشان داده انبساط 3% حداقل است، اما مستعد نقص جدی چروک و چشمک زدن است. ضخامت به طور جدی با نسبت انبساط 6 رسید درصد 16.11 به شدن نازک نرخ حداکثر. باید کاهش می 5 تا 4 بین انبساط نسبت با اولیه لوله از شود می بنابراین توصیه درصد استفاده شود. زمانی که نسبت انبساط 5% بود، حداقل بود شدن نازک نرخ حداکثر و متر میلی 1.562 ضخامت

اولیه لوله از بنابراین است کرده برآورده را تقاضا که درصد 13.22 نتیجه است شده استفاده مقاله این در درصد 5 انبساط با نسبت شده ارائه 1 شکل در درصد 5 انبساط نسبت با تجربی مولفه در فرآیند پیش فرمینگ بسته شدن قالب، به لطف c است. 9. افزایش اندک محیط، ضخامت به طور یکنواخت توزیع شد. در دو گوشه به دلیل انبساط زیاد مطابق شکل 1 نازک، HGPF فرآیند 8d.. شدند

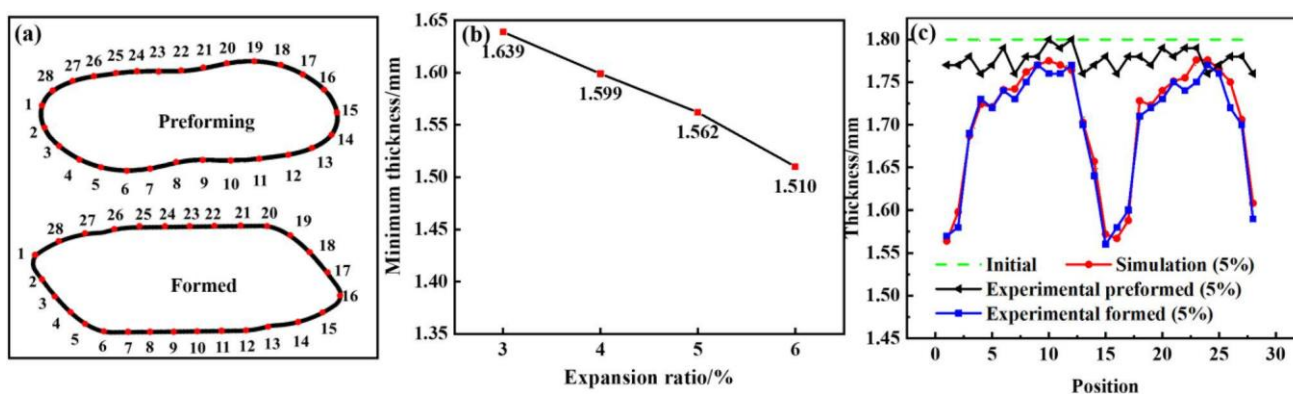
HGPF فرآیند پنجره بهینه سازی

برای بدست آوردن بیشتر پنجره فرآیند شکل دهی معقول، شامل دمای شکل دهی و فشار گاز، بهینه سازی با ترکیب تحلیل اجزا انجام شد. در طول بهینه سازی، دما از 800 تا RSM 900 محدود مدت به لوله بود مگاپاسکال 20 تا 5 بین گاز فشار و °C متغیر بود

شد خیس لوله در دقیقه 10



شکل 8 نتایج شبیه سازی لوله با نسبت انبساط متفاوت (آ (0%؛ ب (3 درصد؛ ج (4 درصد؛ د (5 درصد؛ ه (6 درصد)



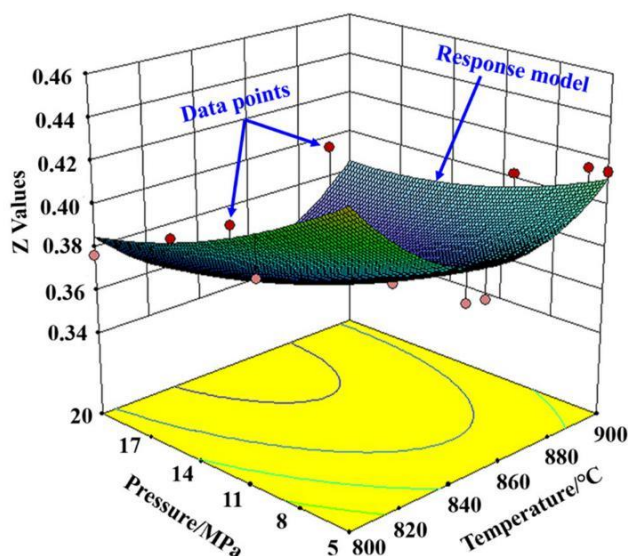
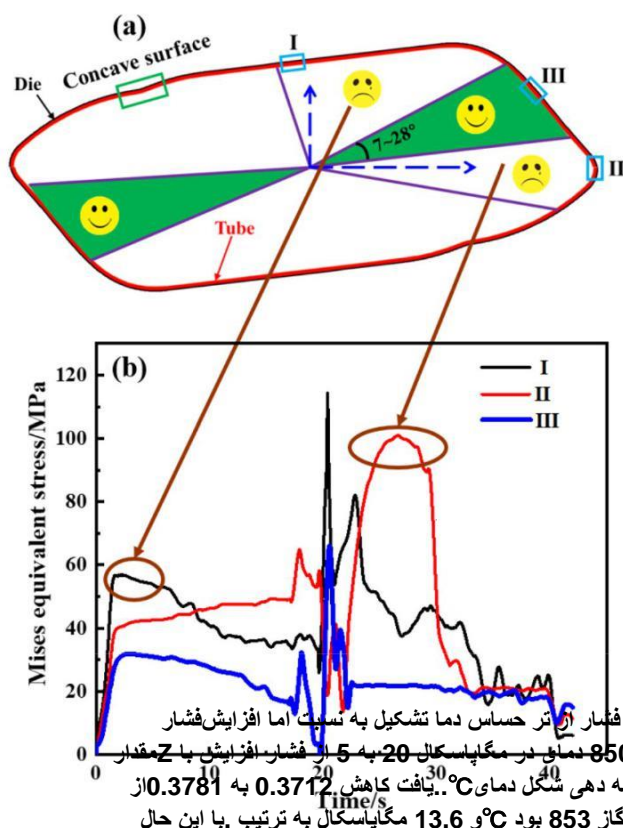
شکل 9 تاثیر نسبت انبساط بر توزیع ضخامت. آ (نقاط اندازه گیری؛ ب (حداقل ضخامت با نسبت انبساط مختلف؛ ج (توزیع ضخامت

دهی طول شکل در نیز دما و شود می گرم قالب تشکیل از قبل دما برای تثبیت به عنوان یک ثابت در نظر گرفته RSM ثابت بود. بنابراین، دما در طول شد. فرآیند شکل دهی شامل چهار مرحله مانند بسته شدن قالب، تحت فشار، شکل دهی و کالیبراسیون بود (شکل 13). 2. در مرحله کالیبراسیون، مقدار فشار حداکثر بود، که همچنین عامل غالب مؤثر بر دقت ابعاد بود. بنابراین، تنها

در طول همچنین و شد بهینه کالیبراسیون مرحله در گاز فشار حداکثر مقدار هر شبیه سازی به عنوان یک ثابت در نظر گرفته شد. برای بیان شهودی تر تعریف شده است که با معادله قابل توزیع ضخامت جزء، ناهمگنی ضخامت

1. است محاسبه

$$\left(\frac{\text{Maximum thickness} - \text{Minimum thickness}}{\text{Minimum thickness}} \right) \times 100\% = \text{Thickness non-uniformity} \% \quad (1)$$



پاسخ سطح تحلیل با بینی پیش نمودار 11 شکل

انتخاب منطقه (ا). مشخصه نقاط معادل تنش و مشخصه نقاط 12 شکل
نقاط مشخصه: (ب) (استرس معادل

است فشار (ا) تر حساس دما تشکیل به نسبت اما افزایش فشار کمی 850 دمای در مگاپاسکال 20 به 5 از فشار افزایش با مقدار و بهینه دهی شکل دمای 30°C یافت کاهش 0.371 به 0.378 از فشار گاز 853 بود 13.6 مگاپاسکال به ترتیب. با این حال طول جزء تشکیل شده بیش از 550 میلی متر بود که نیاز به گاز فشارقوی حجم زیادی دارد. بنابراین، فشار گاز 6 مگاپاسکال برای مولفه ابعادی دقت انحراف شد انتخاب واقعی دهی انجام شکل متر میلی 0.42 مگاپاسکال 6 گاز فشار با 850°C شد تشکیل در دلیل است واقعی مقدار از بالاتر کمی مقدار این شد پیش بینی دماهای در تیتانیوم آلیاژهای تنش کاهش که است احتمالی این بالاباغت کاهش بازگشت فتر می شود. با این حال، در فرایند شود نمی گرفته نظر در فعلی بهینه سازی

HGPF طول در جوش تعیین موقعیت

انتخاب و دارد HGPF بر توجهی قابل تاثیر جوش انتخاب موقعیت تغییر فرایند در جوش های ترک به منجر جوش نامناسب موقعیت شکل می شود. برای تعیین موقعیت جوش مناسب، از شبیه شد استفاده درصد 5 لوله انبساط نسبت با بعدی دو سازی مدل نشان شکل در که همانطور خاص های موقعیت در تنش معادل مختصات سیستم یک 12. شد محاسبه است داده شده می ایجاد عمودی و افقی جهات در (آبی چین نقطه خط) مستطیلی (12.1). شکل گیرد می قرار بخش مرکز در مختصات مبدا شود تنش معادل بزرگترین در مرحله اولیه بسته شدن، در موقعیت در شود جوش خوردگی ترک باعث است ممکن که قالب است حالت تنش جوش، کشش دو محوره است و ایجاد، II موقعیت در جوش موقعیت است آسان HGPF اواخر در جوش ترک در ناحیه مقعر

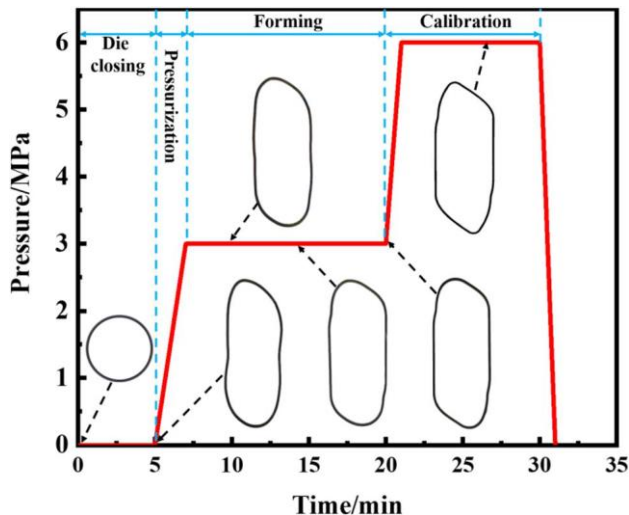
خوردگی ترک خطر همچنین 12a شکل در سبز ناحیه مستطیلی درجه)، جوش در بیشتر زمان III (دارد در موقعیت 7~ 28 ناحیه سه در معادل تنش کند می پیدا تماس قالب دهی با شکل موقعیت معقول III کوچکترین است. بنابراین، جوش در موقعیت است. همانطور که در مرجع [26]، نسبت برآمدگی یکنواخت لوله شکل انحراف گرفتن نظر در با لیزر با شده داده جوش آلیاژ تیتانیوم و یکنواختی ضخامت دیواره نزدیک به 43.8٪ بود. حداکثر کرنش بسیار که است جوش ناحیه در درصد 3 مقاله این قطعه در کوچکتر از 43.8 درصد است. بنابراین، تاثیر درز جوش بر روی

شد گرفته نادیده تغییر شکل

HGPF جزء مشخصات نامنظم آلیاژ TC2

بر اساس نتایج بهینه سازی فوق در دمای 850 درجه TC2 یک جزء داده نشان شکل در خاص بارگذاری مسیر و شد سانتیگراد تشکیل است شده آورده شکل در مختلف مراحل در هندسه 13. شده است، هنگامی که دمای قالب به 850 درجه سانتیگراد افزایش یافت بسته سازی آماده برای قالب سپس و شد داده قرار قالب لوله در شد. در فرایند شکل دهی، فشار گاز ابتدا از 0 به 3 مگاپاسکال افزایش یافت و به مدت 15 دقیقه نگه داشت، بیشتر ناحیه لوله ناحیه دهی شکل دقت بهبود برای شد تبدیل آل ایده به موقعیت گوشه، فشار گاز از 3 به 6 مگاپاسکال افزایش یافت و به مدت 10

داشت دقیقه نگه



HGPf خاص مسیر بارگذاری 13 شکل

که به می‌نشان را TC2 نازک دیواره نامنظم پروفیل مولفه 14 شکل است شده تشکیل کامل طور شده تشکیل ارزیابی مولفه

برای اندازه‌گیری ریزساختارها و خواص جزء تشکیل شده نهایی، 15a است شده داده نشان 1 شکل در شده انتخاب های موقعیت نمونه سوپرمعادل است (d) WS نمونه و (c) BM نمونه و (b) نمونه نمونه



شد تشکیل HGPf توسط TC2 آلیاژ نهایی قطعه 14 شکل

ورق در اولیه ریزساختار با مقایسه در بود (c) 0.26 نمونه و 0.15 (b) کمی متفاوت بودند. (c) و نمونه (b) ریزساختارهای نمونه، 0.1 (b) شکل تعداد کمی دانه های متبلور مجدد دینامیک در نمونه (c) مشاهده شد. همانطور که در شکل نشان داده شده است کمی تغییر WS ریزساختار و کرد. 15 روز که مارتنزیتی به دلیل ناپایدار بودن در دمای بالا به فاز لث در طول شکل گیری نسبتاً کوچک WS تجزیه می‌شد. با این حال، کرنش β بود، بنابراین جهاتی شدن های کمی پس از شکل گیری مشاهده شد. می‌توان زمان دلیل به نهایی شده تشکیل مولفه کلی ریزساختار کرد که خلاصه بود اولیه ورق با مشابه HGPf طول در تشکیل کوتاه

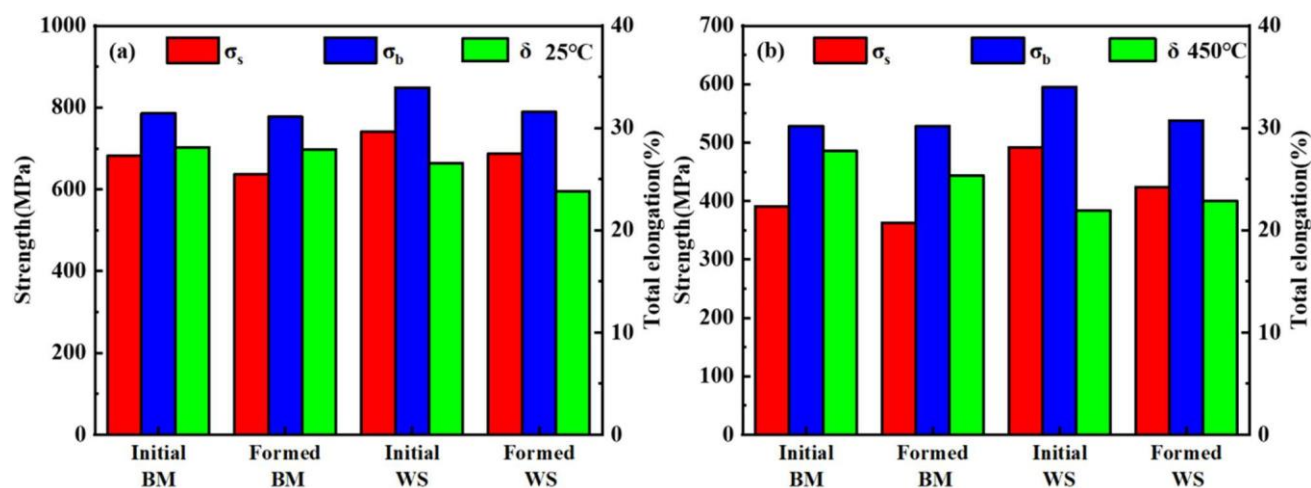
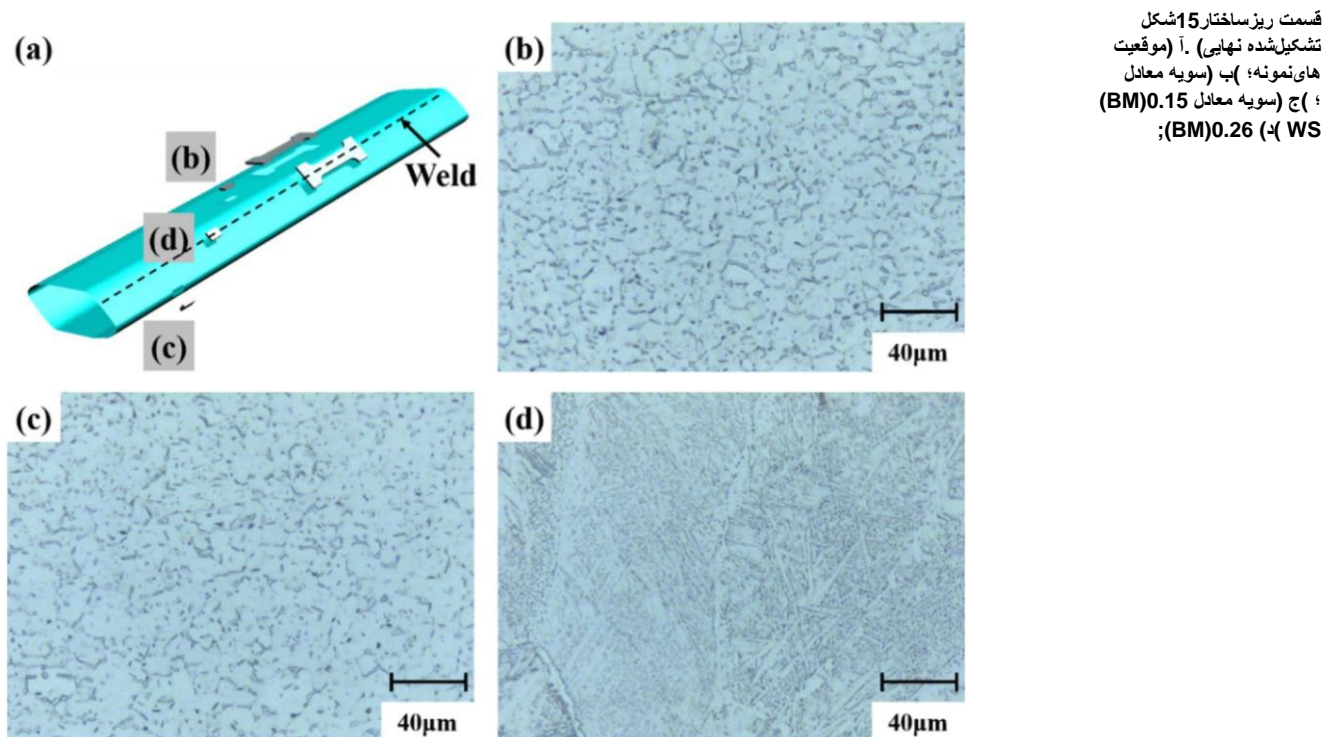
درجه (450) سرویس دمای و (سانتیگراد درجه 25) خواص اتاق تک کششی های آزمایش با نهایی شده تشکیل اجزای (سانتیگراد 16) شد ارزیابی است شده داده نشان شکل در که محوری همانطور با ورق اولیه در هر دو دما تقریباً یکسان است، اما BM خواص استحکام چوش در دمای 25 درجه سانتیگراد 7.05 درصد و در دمای 450 درجه سانتیگراد 9.54 درصد به دلیل تجزیه اجتناب ناپذیر مارتنزیتی در دماهای بالا کاهش یافت. در دمای 450 درجه سانتیگراد، متوسط تنش تسلیم به ترتیب 363.1 و 528.6 مگاپاسکال است. با توجه به BM و تنش کششی میانگین تنش تسلیم تنش کششی به ترتیب 423.8 و 538.0 WS مگاپاسکال است. مطالعات فوق نشان می‌دهد که ریزساختارها و خواص جزء دارد مطابقت اولیه ورق با اساساً

دمای معینی در مدت برای تنش شدن شل از پس فولاد و تیتانیوم تنش آلیاژ بالا به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. [27]، 28. بنابراین، انحرافات ابعادی بیرونی سطح آوردن دست به برای است بالا در شده محاسبه مقدار از کمتر شد استفاده بعدی سه اسکن قدرت تستر یک گرفته از شکل نهایی قسمت Qualify تجاری افزار نرم توسط آل ایده مولفه تصویربرداری با های داده در شکل خاص مقطع سه ابعادی انحراف توزیع شد مقایسه Geomagic بود متر میلی 0.19 حدود ابعادی انحراف حداکثر 17. است شده داده نشان است HGPf توسط شده تشکیل قطعه بالای دقت دهنده نشان که

باید پنجره های شکل دهی، دقت ابعادی و HGPf طراحی اولیه فرآیند خواص مکانیکی پس از شکل را در نظر بگیرد. با توجه به آزمایش های کشش تک محوری داغ و تحولات ریزساختار، محدوده های دما و فشار به دست آورد سپس تجزیه و تحلیل اجزای HGPf تشکیل را می‌توان برای محدود برای بهینه سازی بیشتر فرآیند شکل دهی با آشکار کردن اثرات پارامترهای شکل دهی بر عیوب شکل دهی مانند چین و چروک، ترک و نازک BM از استحکام بالاتری نسبت به WS شدن جدی موضعی مورد نیاز است باعث BM ناحیه در شکل تغییر سازی محلی با تواند می‌که برخورد را است دارای کشیدگی کمتری WS، تغییر شکل غیر یکنواخت شود. علاوه بر این طول در WS در شکست زودرس باعث تواند می‌که است BM به نسبت با را احتمالی پیامد دو باید دهی فرآیند شکل طراحی برای شود گیری شکل کرد جبران دقت

فنر می‌پشت و دهی شکل ابزار ابعاد شامل ابعاد دقت بر عوامل موثر

این باشد



سانتیگراد درجه 450 (ب) و گرادیان 25 (ا) HGPf از بعد و قبل TC2 آلیاژ مکانیکی خواص 16 شکل

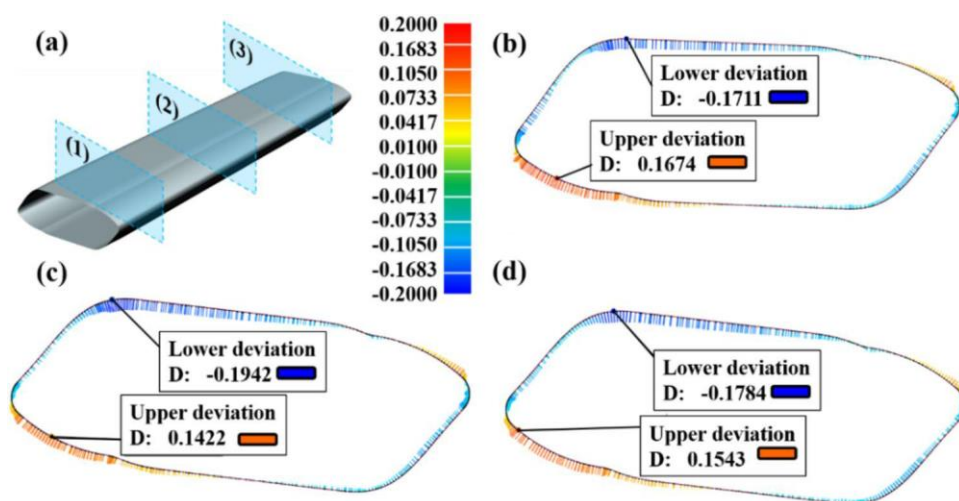
شکل ابزارهای و تیتانیوم آلیاژ برای مواد حرارتی ضرایب انبساط
دهی متفاوت است، بنابراین ابعاد ابزار شکل دهی باید با دقت با
دقیق مقدار [29]. شود محاسبه حرارتی انبساط ضرایب توجه به
توان می را بهار بازگشت. است مهم بسیار حرارتی ضرایب انبساط
بینی پیش استرس آرامش های منحنی و جوان مدول به با توجه
کرد. به طور کلی، پشت فنر را می توان به طور موثر با افزایش
شکل عمدتاً از پس مکانیکی خواص داد کاهش دهی دمای شکل
توسط ریز ساختار اولیه و پارامترهای تغییر شکل از جمله دما، نرخ

کرنش، کرنش و

زمان برگزاری، که باید با توجه به نیاز خدمات طراحی شود

به مواد اولیه قبل BM در این مقاله، هر دو ریز ساختار و خواص
و بالا دهی نسبتاً شکل دمای دلیل به است نزدیک HGPf از وبعد
زمان چرخه طولانی در طول شکل گیری سوپر پلاستیک معمولی
کاهش اولیه ماده با مقایسه در تواند می گیری شکل از خواص پس
یابد. 30 با این حال، کل زمان گرم شدن و شکل دهی لوله در
کمتر از 30 دقیقه بود، بنابراین تقریباً هیچ کاهش HGPf طول

ابعاد به توجه با نشد قدرتی مشاهده



تشکیل‌شده قسمت ابعادی دقت 17 شکل

(ب). گیری‌شده اندازه مقاطع (ا). نهایی
3 نمایه (د) 2: پروفایل (ج) 1: پروفایل
(متر میلی: واحد)

دقت، اجزای تشکیل‌شده توسط هر دو فرآیند می‌تواند نیازهای سرویس را مزایای راندمان بالا، مصرف انرژی کم HGPf برآورده کند. بنابراین، فرآیند معمولی دهی سوپرپلاستیک شکل با مقایسه در را عالی مکانیکی خواص و دهد می‌نشان.

موادو انحراف ابعادی جزء تنها حدود 0.19 میلی متر را می

آورد دست توان‌به

نتیجه‌گیری

TC2 یک جزء آلیاژ تیتانیوم HGPf در این مقاله، پنجره فرآیند آزمایش شد. سازی بهینه نامنظم های پروفایل با لیزر با شده جوش داده های کششی تک محوری داغ، خصوصیات ریزساختار، شبیه سازی اجزای به اصلی نتایج. قرارگرفتند مطالعه مورد HGPf های آزمایش و محدود است زیر شرح

در است فاز تبدیل و DRX عمدتاً TC2 تیتانیوم آلیاژ ریزساختار تکامل 1. با دمای بین 750 تا 850 درجه سانتیگراد BM طول تغییر شکل داغ عامل اصلی تغییر تکامل ریزساختار است، اما تبدیل فاز بیشتری DRX ثانویه α تشکیل به منجر که رخداد سانتیگراد درجه 900 دمای در شد شکل تغییر از پس

احتمالی و شدن چروک از تا شود طراحی دقت با باید لوله اولیه اندازه 2. در جوش که می‌شود پیشنهاد. شود جلوگیری موضعی شدید شدن نازک ترک از تا گیرد قرار HGPf طول در معادل تنش کمترین با مقطعی شود جلوگیری احتمالی

پیشنهاد تیتانیوم آلیاژ از HGPf پنجره ایجاد برای جدیدی روش 3. شد. روش بهینه سازی پارامترهای فرآیند با در نظر گرفتن دقت ابعادی استفاده شد. یک جزء RSM توسط HGPf و یکنواختی ضخامت در با موفقیت برای تایید پنجره فرآیند TC2 آلیاژ تیتانیوم واجد شرایط بهینه سازی شده تشکیل شد. خواص مکانیکی جزء تشکیل شده مشابه است اولیه

و U1937204 (شماره) چین طبیعی علوم ملی بنیاد توسط کار منابع مالی این (LH2021E058) بنیاد علوم طبیعی استان هیلونگیانگ چین (شماره 51401065) مالی حمایت 2021T14015 و (2019M661278) چین دکتری پسا علوم بنیاد و شد.

اعلامیه‌ها

ندارند رقابت به ای علاقه هیچ که کردند اظهار تضاد منافع نویسندگان

منابع

1. برای سیال فشار تشکیل فناوری فرآیندهای و میاتی (2021) اس یوان 1. Eng Prc 7:358-366. نازک دیواره اجزای پیچیده
2. Int J Mater Form 13:789-828. هیدروفرمینگ فناوری جدید بررسی. 2020(D کاربردها، حوزه های تحقیقاتی، تاریخچه و آینده آن در تولید Savings, Zuelli N, Corney J, 2. Bell C
3. کار قطعه داغ پرس تشکیل فرآیند روی بر مطالعه 8(10): 827. Ti55. متالز بازل (2018) D بالا دمای با تیتانیوم آلیاژ از بزرگ خطی ژنراتیکس منحنی 3. Wu F, Xu W, Yang Z, Guo B, Shan
4. گاز تشکیل فرآیند برای فرآیند توسعه 10:1150. (Ti-3Al-2.5V) فلزات بازل (2020) S, Psyk V تیتانیوم توخالی های پروفیل سوپرپلاستیک لوله داغ 4. Tr  n R, Reuther F, Winter
5. با لایه چهار توخالی ساختار برای. Int J Mater Form 14:1057-1066. 5. Du Z
6. پیوند شکل دهی/ انتشار فوق پلاستیک و خاصیت TA15 شبکه ای Zhang K مکانیکی آلیاژ (2021) 5. Du Z
7. Ti-6Al-4V استاندارد و. Mater 838-839:171-176 علمی انجمن Ti-6Al-4V. ریز ورق دانه برای تسلیم استحکام خاصیت کاهش بر سوپرپلاستیک دهی تأثیر شکل 6. Sartkulvanich P, Li D, Crist E, Yu K (2016)
8. (S) پیچیده نازک های دیواره برای بالا راندمان با دهی فرآیندهای شکل 7. 2020(Wang K, Wang L, Zheng K, He Z, Politis D, Liu G, Yuan

- Manuf 2:032001 ها دیدگاه و ترین پیشرفته: تیتانیوم اجزای آلیاژ
Int J Extrem
Int J Adv Manuf Technol 87:1823-1833 درجه 800 دمای در داغ گاز در.
ای لوله اجزای ریزساختار و بارگذاری مسیر مطالعه Ti-3Al-2.5V سانیگراد
8. Wu Y, Liu G, Wang K, Liu Z, Yuan S (2016)
J Mater Res Techol 18:3916-3932 با گاز سریع دهی شکل روی مطالعه.
9. اجزا تقویت های مکانیسم و تیتانیوم آلیاژهای برای قالب درون خاموش کردن
Dang K, Wang K, Chen W, Liu G (2022)
Mater Sci Eng, A708:149-158 برآمدگی گاز شرایط و محوری تک کشش تحت.
آلیاژ تیتانیوم داغ شکل تغییر مکانیسم بر مجدد تبلور اثر TA15 محوره دو
Wang K, Liu G, Huang K, Politis J, Wang L (2017)
10. دینامیکی مجدد تبلور اساس بر.
J Mater Process Tech 259:387-396 پذیرش شکل افزایش برای رویکردی مدلسازی و تجربی مطالعه TA15
G, Zhao J, Huang K, Wang L (2018) آلیاژ تیتانیوم آلیاژ لوله برآمدگی گاز
11. Wang K, Liu
Ti-3Al-2.5V. Int J Adv Manuf Technol 85:869-879 اثرات رفتار تنش
جریان، مسیر بارگذاری فشار و تغییرات دما بر شکل گیری پنوماتیک فشار بالالوله
12. Liu G, Wang J, Dang K, Yuan S (2016) های
Int J Adv Manuf Technol 81:1809-1816 در لوله گاز توسط شده تهیه.
ای لوله اجزای شکل تغییر رفتار بر تغذیه طول اثر Ti-3Al-2.5 V دمای بالا
13. Liu G, Wu Y, Wang D, Yuan S (2015)
آلیاژ های دم سازی شبیه و آزمایش روی مطالعه. JOM 70:1118-1123
Y, Liu Q (2018) 14. جریان کمک به دهی شکل فناوری طریق تیتانیوم از
Yang J, Wang G, Zhao T, Li
آلیاژهای داغ گاز سریع تشکیل در پیشرفت. Procedia Manuf 50:265-270
K, Zhao J (2020) 15. تیتانیوم: مکانیسم، مدل سازی، نوآوری ها و کاربردها
Liu G, Dang K, Wang
شده خم های لوله داغ فلزی گاز تشکیل. AIP Conf Proc 1896:050009
Paul A, Werner M, Trần R, Landgrebe D (2017) 2
16. یوان اس (2016) فناوری هیدروفرمینگ مدرن، ویرایش دوم. مطبوعات 17.
صنعت دفاع ملی، پکن
J Mater Process Tech 237:88-95 با گاز دهی شکل فناوری طراحی.
و کششی برآمدگی آزمایش از آمده دست به ماده های ثابت استفاده از
18. Aksenov S, Kolesnikov A, Mikhaylovskaya A (2016) آزاد
در مورد دستیابی تجربی به شرایط بهینه (K) و یلسون، G 19.
JR Stat Soc 13 (1): 1-45
طول فرآیند در فرآیند های خرابی بینی پیش برای جایگزین های مدل مطالعه تطبیقی.
A (2022) بالا مقاومت با فولاد فلزی ورق دهی شکل
20. Mrabti I, Hakimi A, Touache A, Chamat
Int J Adv Manuf Technol 121:199-214
- J Alloy Comp 89:639-646 AI-24Nb-0.5Mo داغ گاز تشکیل با شده ساخته.
دمای در مکانیکی خواص افزایش روی بر ریزساختار تحلیل و تجزیه Ti-22
Z, Liu G (2019) 21. Jiao
X, Wang D, Yang J, Liu
اصطکاکی اغتشاشی کمک به طرفه دو افزایش دهی شکل برای فرآیند پنجره هادر بررسی
Chen J (2022) اتصال همزمان ورق های فولاد و آلیاژ آلومینیوم. بین المللی
Li M, Liu X, 22. Wu R
J Mater 15:3 فرم
تشکیل دهنده فشار گاز داغ جزء لوله ای آلیاژ تیتانیوم با Ti-55. 4636:(20)13 مواد
K, Shi C, Zhu S, Wang Y, Shi J, Liu G (2020) 23. بالا دمای
Wang
درمان از جدید ترکیبی فرآیند یک. J Mater Process Tech 288:116904
24. تیتانیوم آلیاژهای برای استرس آرامش پیری و داغ گاز تشکیل-محلول
Wang K, Jiao Y, Wu X, Qu B, Wang X, Liu G (2021)
تشکیل مورد در تجربی بررسی CP-Ti. J Mater Process Tech 278:116492
Tao K (2019) (Liu G, K
Dang, Chen J, 25. Tang Z
و پذیرش شکل TA15 لیزر با شده داده جوش. Mater Des 91:269-277
S (2016) 26. تیتانیوم آلیاژ های لوله داغ گاز تشکیل برای تکامل ریزساختار
Wang K, Liu G, Zhao J, Wang J, Yuan
به وابسته فنی برگشت بینی پیش. Int J Adv Manuf Tech 115:637-653
27. تیتانیوم آلیاژ های ورق همدم داغ زنی مهر برای تنش آرامش اثر زمان با
Chen Y, Han G, Li S, Li Y, Li Z, Lin Z (2021)
پشت فنی اعتبارسنجی و بینی پیش. Int J Mater Form 14:1355-1373
M (2021) 718 در شکل دهی گرم یک جزء منحنی دوگانه در آلیاژ
E, Schill M, Niklasson F, Åkerfeldt P,
Oldenburg 28. Pérez C, Odenberger
Mater Des 30:3904-3907 Ti-6Al-4V با دقت بالا تشکیل دهنده ضربه.
مطالعه بر روی کنترل ضربه انبساط حرارتی ZrO2-TiO2 برای جزء
Jiang S (2009) 29. Zhang K قالب-سرامیکی
دهی شکل فناوری مورد در تحقیق. Defect Diffus Forum 385:468-473
Q (2018) 30. ریلی ترافیک برای صنعتی آلومینیوم آلیاژهای سریع ابرپلاستیک
Wang G, Jia H, Gu Y, Liu
وابستگی های و شده منتشر های نقشه در قضای ادعاهای به توجه با یادداشت ناشر
Springer Nature ماند می باقی طرف بی سازمانی
این مقاله انحصاری حقوقی (دیگر شریک یا انجمن یک مثال عنوان به) آن دهنده بامجوز.
خود آرشید دارند حقوق دارندگان سایر با (ها) نویسنده با انتشار نامه توافق تحت را
و انتشار نامه توافق شرایط چنین تحت مقاله صرفا این شده پذیرفته خطی نسخه نویسنده
Springer Nature است اجرا قابل قوانین