



بررسی تجربی تاثیر شکل مود ارتعاشی بر رفتار فشاری آلیاژ Ti-6Al-4V تحت اعمال ارتعاشات فراصوتی

مرتضی صادقی^۱، وحید فرتاش‌وند^۲، امیر عبدالله^۳، علیرضا فلاحي آرزودار^۳ و رضوان عابدینی^۴

^۱ دانش آموخته مقطع ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ استادیار، گروه طراحی صنعتی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران.

^۳ دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

^۴ استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳

چکیده

اعمال ارتعاشات فراصوتی توان بالا در فرآیندهای شکل‌دهی منجر به تغییر رفتار مکانیکی ماده و کاهش تنش سیلان در حین اعمال ارتعاشات می‌شود. این امر سبب بهبود شکل‌پذیری ماده و کاهش نیروهای شکل‌دهی می‌شود. برای بررسی تاثیر ارتعاشات فراصوتی روی مواد مختلف، می‌توان از آزمون کشش و فشار استاندارد استفاده کرد. در این پژوهش، برای بررسی رفتار فشاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V تحت اعمال ارتعاشات فراصوتی، یک مجموعه طراحی، تحلیل، ساخته و آزمایش شد. ارتعاشات فراصوتی توسط مبدل تولید و از طریق تقویت‌کننده (بوستر) و ابزار یا سنبه فشارنده (هورن) به نمونه آزمون منتقل می‌شود. هندسه ابزار (هورن) و شکل مود ارتعاشی (گره یا شکم) و نیز توان اعمال ارتعاشات فراصوتی از جمله پارامترهای موثر در این فرآیند است. از اینرو، شکل‌های مختلف سنبه ساخته شد تا نمونه در موقعیت گره (حداقل دامنه ارتعاشی) و شکم ارتعاشی (حداکثر دامنه ارتعاشی) قرار گیرد و اثر آن بر روی میزان انتقال امواج و بازدهی آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب کاهش تنش سیلان ماده (تا حدود ۱۷٫۳۶ درصد) گردید. کاهش تنش سیلان به توان ارتعاشات فراصوتی وابسته است و با افزایش توان، تنش سیلان کاهش بیشتری می‌یابد؛ همچنین پدیده سخت‌شوندگی پسماند در این آلیاژ مشاهده نشد و بطور کلی، اعمال ارتعاشات فراصوتی منجر به کاهش کرنش شکست نمونه‌ها شد. در نهایت تفاوت میزان انتقال ارتعاشات فراصوتی به نمونه‌ها با سنبه‌های مختلف مشهود بود و حالت شکل مود ارتعاشی با موقعیت گره ارتعاشی بر روی نمونه اثرپذیری بیشتری را بر روی کاهش تنش سیلان داشته است.

کلمات کلیدی: ارتعاشات فراصوتی؛ آلیاژ تیتانیوم؛ گره ارتعاشی؛ شکم ارتعاشی؛ آزمون فشار

Experimental investigation of vibrational mode shape influence on compression behaviour of Ti-6Al-4V alloy under superimposed ultrasonic vibration

M. Sadeghi¹, V. Fartashvand², A. Abdullah³, A. Fallahi Arezoodar³, R. Abedini⁴

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Amirkabir Univ., Tehran, Iran

¹ Graduate of M.S.c, Mech. Eng., Amirkabir Univ., Iran

⁴ Assis. Prof., Mech. Eng., Iran Univ. of Sci. and Tech., Iran

² Assis. Prof., Industrial. Design., Alzahra Univ., Tehran, Iran

Abstract

Superimposing high power ultrasonic vibration on metal forming processes changes the mechanical behavior of the material and reduces its flow stress. These phenomena improve the ductility of material and reduce forming forces. To investigate the influence of ultrasonic vibration on various materials, standard compression and tensile tests under ultrasonic vibration could be performed. This research investigates the compression behavior of Ti-6Al-4V alloy under superimposed ultrasonic vibration. For this purpose, a special set-up was designed, fabricated and tested. Ultrasonic vibration is transmitted from the ultrasonic transducer to the booster and then guided by horn (punch) to apply to test sample. Horn geometry, vibrational mode shape and ultrasonic power were selected as input variables. The effect of specimen position in system vibrational mode shape was studied by using different ultrasonic transmitters, which allowed the specimen to place at node and anti-node positions. It is found that ultrasonic vibrations reduced the formability of this alloy. Acoustic hardening phenomena do not observe in this material. Also, flow stress of the material reduced under ultrasonic vibration up to 17.63% which has direct relation to ultrasonic power. In addition, the most efficiency was observed when the specimen placed in the node position.

Keywords: Ultrasonic Vibration; Titanium Alloy; Node Position; Anti-node Position; Compression Test;

۱- مقدمه

بهبود فرآیند شکل دهی مواد با استحکام بالا نظیر سوپرآلیاژها، فولادهای آستنیتی و آلیاژهای تیتانیوم، مورد توجه پژوهشگران قرار دارد؛ زیرا شکل دهی این آلیاژها در دمای پایین به دلیل استحکام بسیار بالای آنها سخت و هزینه‌بر است [۱]. یکی از روش‌های پیشنهادی جهت کاهش موقتی استحکام ماده، اعمال ارتعاشات توان بالای فراصوتی به قطعه و یا ابزار شکل دهی در حین تغییر شکل است. نتایج تحقیقات در این حوزه نشان می‌دهد که اعمال ارتعاشات فراصوتی حین عملیات شکل دهی موجب کاهش تنش سیلان ماده و در نتیجه کاهش نیروهای شکل دهی می‌شود [۲].

برای تعیین رفتار مواد مختلف و میزان اثرپذیری آنها از ارتعاشات فراصوتی، محققان به بررسی تأثیر ارتعاشات در نمودار تنش- کرنش حین آزمون فشار و کشش پرداخته‌اند. بر اساس مطالعات انجام گرفته، در حین اعمال ارتعاشات فراصوتی، با تحریک نابجایی‌ها و همزمان کاهش تنش برشی لازم جهت لغزش و در نتیجه افزایش چگالی نابجایی‌ها، میزان تنش لازم برای سیلان ماده کاهش می‌یابد که به این پدیده نرم‌شوندگی آکوستیکی^۱ می‌گویند [۳ و ۴]. لانگنکر [۵] به مطالعه اثر ارتعاشات فراصوتی بر روی خواص مکانیکی فلزاتی نظیر آلومینیوم و روی پرداخت و بیان کرد که در اثر اعمال ارتعاشات شدید که انرژی آن از حد معینی باید بیشتر باشد، حد تسلیم فلزات به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. این کاهش تنش تسلیم به طور مستقیم با شدت انرژی ارتعاشات فراصوت اعمالی به نمونه متناسب است. نروبای [۶] اثر ارتعاشات فراصوتی را بر روی آلیاژهای با شکل‌پذیری کم مثل فولادهای پرآلیاژ، سوپر آلیاژهای پایه نیکل و چند آلیاژ تیتانیوم بررسی و بیان کرد که در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت بر این فلزات، تنش تسلیم، استحکام و همچنین مقاومت به تغییر شکل کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه تنش تسلیم مستقل از نسبت ارتفاع به قطر نمونه است؛ لذا معیار خوبی برای مقایسه‌ی رفتار ماده با و بدون ارتعاشات فراصوت می‌باشد. به همین جهت نروبای نسبت تنش تسلیم نمونه در آزمون فشار در حالت معمولی به حالت با فراصوتی را در مقابل تغییر دما و دامنه

جابجایی مبدل بررسی کرد. تمرکز آزمایش‌های نروبای بیشتر روی آزمون فشار بود؛ زیرا آزمون فشار نسبت به آزمون کشش دارای مزایایی نظیر تغییر شکل بیشتر و اثر یکنواخت ارتعاشات فراصوتی بر روی حجم تغییر شکل داده شده از نمونه است. یائو و همکاران [۷ و ۸] اثر نرم‌شوندگی حاصل از ارتعاشات صوتی و سخت‌شوندگی پسماند^۲ را در آلیاژ خالص تجاری ۱۱۰۰ آلومینیوم بررسی کردند. پس از اعمال ارتعاشات فرکانس ۹.۳kHz و دامنه‌ی ۲/۸μm به نمونه آلومینیومی در حین فشردن، مشاهده شد که تنش با کاهش ۳۰ درصدی مواجه می‌شود که این کاهش به دو قسمت ثابت و نوسانی تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر در حین اعمال ارتعاشات فراصوتی به قطعه، تنش مورد نیاز برای فشردن نمونه در اثر نرم‌شوندگی آکوستیکی به میزان ثابتی کاهش می‌یابد؛ همچنین، کاهش اصطکاک و زبری سطح نیز مشاهده گردید. آنها سه عامل برهم‌نهی^۳ تنش‌ها، نرم‌شوندگی آکوستیکی و کاهش اصطکاک را در کاهش تنش در حین فشردن موثر دانسته و عامل غالب را نرم‌شوندگی آکوستیکی نامیدند. تانگ و همکاران [۹]، تغییر شکل پلاستیک آلیاژ منیزیم AZ۳۱ را در آزمون کشش تحت اثر ارتعاشات فراصوتی با فرکانس ۱۵kHz و توان ۲kW بررسی نمودند. آنها مشاهده کردند که در ارتعاشات با دامنه کم، نرم‌شوندگی آکوستیکی اتفاق و مقاومت به تغییر شکل نمونه کاهش و درصد ازدیاد طول آن افزایش می‌یابد؛ اما در ارتعاشات با انرژی بالاتر (۶۰٪ و ۹۰٪ دامنه حداکثر)، سخت‌شوندگی باعث کاهش شکل‌پذیری و کرنش نمونه قبل از شکست می‌شود. دلیل این امر تردی و شکنندگی و کاهش تشکیل دو قلوبی‌ها^۴ بیان شد. فرتاش‌وند و همکاران [۱۰]، به بررسی اثر ارتعاشات فراصوتی بر رفتار تنش-کرنش در حین آزمون کشش آلیاژ Ti-6Al-4V پرداختند و پدیده نرم‌شوندگی آکوستیکی را در حین اعمال ارتعاشات گزارش کردند؛ همچنین پدیده سخت‌شوندگی آکوستیکی^۵ برای این آلیاژ مشاهده نگردید. لئو و همکاران [۱۱]، به بررسی اثر فراصوتی روی تیتانیوم خالص در حین اجرای آزمون فشار پرداختند که منجر به کاهش تنش سیلان ماده گردید. ژائو و

⁴ Twin

⁵ Acoustic Hardening

¹ Acoustic Softening

² Residual Acoustic Hardening

³ Superposition

استفاده شده است تا اثر قرارگیری قطعه در موقعیت‌های حداکثر دامنه ارتعاشی (شکم) و حداکثر تنش ارتعاشی (گره) نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. از جنبه‌های نوین این پژوهش می‌توان به بررسی اثر ارتعاشات فراصوتی در دو موقعیت کمینه و بیشینه دامنه ارتعاشی (گره و شکم)، بررسی اثر جنس آلیاژ Ti-۶Al-۴V و قابلیت اجرای فرآیند کله‌زنی یا فورج این آلیاژ تحت ارتعاشات فراصوتی اشاره کرد.

۲- چیدمان آزمون

ارتعاشات فراصوتی می‌تواند به صورت موده‌های طولی، عرضی، شعاعی و خمشی تولید و به قطعات مدنظر منتقل شوند [۱۷]. پژوهشگران متعددی با اعمال ارتعاشات فراصوتی طولی در فرآیندهای شکل‌دهی نتایج مناسبی حاصل کرده‌اند. از دلایل این امر می‌توان به احتمال صحیح بودن تئوری برهم‌نهی تنش‌ها اشاره کرد که در صورت اعمال ارتعاشات فراصوتی به صورت طولی، تنش‌های طولی آکوستیکی با تنش فشاری اعمالی به نمونه همراستا بوده و می‌توانند با یکدیگر جمع جبری شوند. همچنین، در خصوص اجرای آزمون فشار مطابق استاندارد ASTM E۹ [۱۸]، نمونه‌های آزمون باید بدون قید جانبی تحت فشار قرار گیرند؛ به عبارتی اعمال ارتعاشات عرضی می‌تواند موجب لغزش نمونه بین سنبه‌های اعمال نیرو و یا عدم هم‌محوری نمونه‌ها گردد؛ لذا با در نظر گرفتن این دو موضوع، در این پژوهش ارتعاشات فراصوتی به صورت طولی به نمونه‌ها اعمال شد.

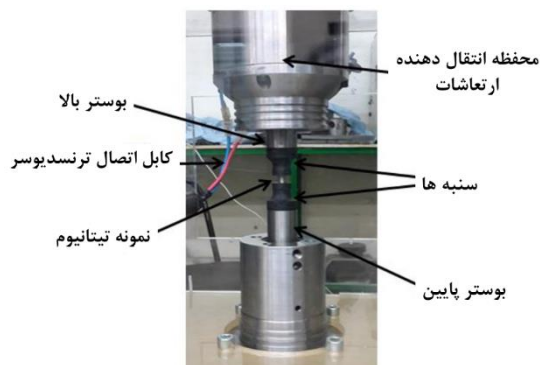
اجزا آزمون فشار تحت ارتعاشات فراصوتی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای ایجاد ارتعاشات فراصوتی از مبدل فراصوتی با توان ۳kW و فرکانس نامی ۲۵kHz ساخته شده توسط نویسندگان استفاده گردید [۱۰]. از این مشخصات ارتعاشی نویسندگان برای بررسی رفتار کششی این آلیاژ استفاده کرده‌اند [۱۰].

همکاران [۱۲]، به بررسی اثر ارتعاشات فراصوتی در منحنی تنش- کرنش آلیاژ Ti-۳۴-۲۴ AA و Ti-۶۱-۶ AA پرداختند. برخی محققان مانند داوسون [۱۳]، تاکائو [۱۴] دلیل این رفتار ماده را ماهیت دینامیکی تنش اعمالی یعنی برهم‌نهی یک تنش استاتیکی (شکل‌دهی) و یک تنش دینامیکی (آکوستیکی) می‌دانند و میزان افت تنش استاتیکی را با مقدار تنش آکوستیکی یکسان در نظر می‌گیرند که اثر بلاها^۱ جنبه میکروسکوپی و اثر برهم‌نهی جنبه ماکروسکوپی پدیده را در نظر می‌گیرد. در حوزه ماکروسکوپی ایزومی [۱۵] اثر حرارت‌دهی موضعی را بیان نموده است که طبق آن، با اعمال ارتعاشات فراصوتی به فلز، گرم شدن موضعی در اطراف عیوب کریستالی نظیر نابجایی‌ها رخ می‌دهد. این گرم شدن موضعی باعث کاهش موضعی استحکام فلز و تسهیل سیلان در آن نقاط می‌شود و حرکت نابجایی‌ها را راحت می‌نماید؛ در نتیجه تنش لازم برای حرکت نابجایی‌ها که یعنی تنش برشی لازم برای تغییر شکل ماده، کاهش می‌یابد. این کاهش تنش با افزایش شدت ارتعاشات فراصوتی یا دامنه ارتعاشی، بیشتر خواهد شد. همچنین گزارش شده است که نظریه برهم‌نهی فقط در توان‌های کم ارتعاشات فراصوتی قابل توجیه است. نتایج آزمایش‌های یائو [۸]، تاکائو [۱۴] و وینسپر [۱۶] حاکی از آن است که پس از قطع یا حذف اعمال ارتعاشات فراصوتی، رفتار سیلان ماده دو حالت دارد: الف) مقدار تنش به منحنی تنش-کرنش عادی یعنی حالت بدون اعمال ارتعاشات بر می‌گردد؛ ب) میزان تنش سیلان ماده فراتر از منحنی تنش-کرنش در حالت عدم حضور ارتعاشات می‌رسد که به این حالت سخت‌شوندگی آکوستیکی اطلاق می‌شود.

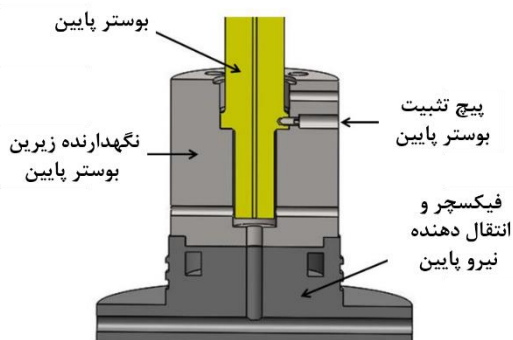
در این تحقیق به بررسی اثر ارتعاشات فراصوتی در رفتار فشاری نمونه‌های آلیاژ تیتانیوم Ti-۶Al-۴V به عنوان پرکاربردترین آلیاژ تیتانیوم جهت به کارگیری در فرآیند شکل‌دهی این ماده پرداخته شده است. نویسندگان [۱۰] قبلاً به بررسی رفتار کششی این آلیاژ در حین اعمال ارتعاشات فراصوتی پرداخته‌اند. یکی از مباحث مهم در استفاده از ارتعاشات فراصوتی موقعیت قرارگیری قطعه در مود ارتعاشی مجموعه است؛ به گونه‌ای که موقعیت گره برابر حداکثر تنش آکوستیکی و موقعیت شکم برابر حداقل تنش آکوستیکی است؛ از اینرو، برای بررسی این امر، از سنبه‌ها با هندسه‌های متفاوت

^۱BLAHA Effect

برای گرفتن تقویت کننده توسط نگهدارنده بالایی نیاز به انطباق فشاری وجود داشت که ضمن انجام این کار، بوسیله یک پیچ جانبی نیز تقویت کننده نسبت به گیرنده ثابت نگهداشته شده است. برای قسمت پائین چیدمان نیز جهت جلوگیری از وارد شدن ارتعاشات به فک‌های دستگاه آزمون فشار، رویه‌ای مشابه با همین روش در نظر گرفته شده است که در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۱- اجزا چیدمان آزمون فشار تحت ارتعاشات فراصوتی

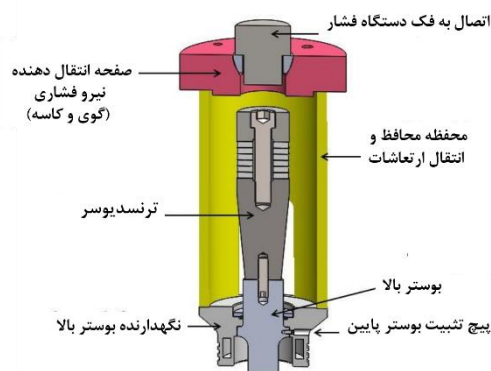


شکل ۲- نگهدارنده تقویت کننده پایین

تقویت کننده پایین توسط انطباق فشاری و پیچ جانبی به نگهدارنده پایین متصل شده و نیروی اعمال شده از فک پایین به گره ارتعاشی منتقل می‌شود. لازم به ذکر است که انتهای تقویت کننده پایین شکم ارتعاشی است و با توجه به فضای موجود می‌تواند آزادانه در جهت طولی حرکت کند. نیروی فشاری و همچنین ارتعاشات طولی فراصوتی توسط دو تقویت کننده پایین و بالا به سنبه‌های اعمال فشار منتقل شده و سنبه‌ها این نیرو و ارتعاشات را به نمونه آزمون فشار وارد می‌کنند.

جهت انتقال هرچه بهتر ارتعاشات، تقویت کننده انتقال دهنده ارتعاشات از جنس تیتانیوم Ti-6Al-4V ساخته شد. با توجه به استحکام و سختی بالای نمونه‌های مورد آزمایش (تیتانیوم Ti-6Al-4V) سنبه‌ها باید از ماده‌ای سخت و دارای استحکام بالاتر انتخاب شوند تا در حین آزمون فشار، دچار تغییر شکل نشوند و روی سطح آنها فرورفتگی ایجاد نشود. به همین دلیل سنبه‌ها از فولاد ابزار ۱,۲۴۳۶ (SPKR) ساخته شد. با توجه به سختی اندازه‌گیری شده نمونه‌های تیتانیوم (حدود ۳۵HRC)، لذا جهت ممانعت از ایجاد فرورفتگی روی سطح سنبه‌ها سختی آنها بایستی بالاتر از ۳۵HRC باشد. فولاد

مطابق شکل ۲، این ارتعاشات توسط انتقال دهنده مخروطی به یک تقویت کننده از جنس Ti-6Al-4V منتقل می‌شود. این تقویت کننده ارتعاشات را به سنبه اعمال فشار منتقل کرده و سنبه همزمان با اعمال نیروی فشاری به نمونه آزمون فشار، ارتعاشات طولی را به نمونه انتقال می‌دهد. یکی از ملاحظات در طراحی سیستم آزمون‌ها، عدم قرارگیری مجموعه مبدل فراصوتی تحت تنش است؛ لذا باید تمهیداتی را در نظر گرفت که این مشکل بر طرف گردد. در این سیستم از طریق یک لوله از جنس فولاد سازه‌ای St37 استفاده شده است که نیروی پرس را از طریق یاتاقان کروی به تقویت کننده بالایی و در نتیجه سنبه فشرده‌سازی منتقل می‌نماید. همچنین به منظور خنک‌کاری مبدل، فضای لازم در این لوله برای گردش هوا تعبیه شده است. قاب نگهدارنده تجهیزات فراصوتی و گیرنده تقویت کننده تیتانیومی در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- قاب نگهدارنده تجهیزات فراصوتی و نگهدارنده تقویت کننده تیتانیومی

۳- شبیه‌سازی عددی

برای قرار گرفتن نمونه در موقعیت گره ارتعاشی، ابعاد مجموعه قطعات شامل تقویت‌کننده‌های بالا و پایین، سنبه‌های بالا و پایین و نمونه آزمون فشار به گونه‌ای طراحی شد که در ناحیه ای اتصال تقویت‌کننده‌ها به گیرنده‌ها و نیز بر روی نمونه آزمون فشار، گره ارتعاشی ایجاد شود؛ بنابراین مطلوب‌ترین مود فرکانسی طولی برای رسیدن به این شرایط، مودی می‌باشد که مجموعه‌ی تقویت‌کننده‌ها، سنبه‌ها و نمونه دارای ۳ گره در وسط تقویت‌کننده بالا، تقویت‌کننده پایین و نمونه و همچنین ۴ شکم در محل اتصال مبدل به تقویت‌کننده بالا، محل اتصال تقویت‌کننده بالا به سنبه بالا، محل اتصال سنبه پایین به تقویت‌کننده پایین و انتهای تقویت‌کننده پایین باشد. شرط دیگر برای نوسان هماهنگ مجموعه آزمون این است که فرکانس تشدید (رزونانس^۲) مجموعه طراحی شده با فرکانس ارتعاشات تولید شده توسط مبدل برابر باشد؛ در غیر اینصورت با اعمال ارتعاشات با فرکانس متفاوت با فرکانس تشدید سیستم، نقاط گره و شکم جابجا خواهند شد و ارتعاشات به فک‌های دستگاه منتقل می‌شود. بر این اساس، مود ارتعاشی مطلوب بر اساس تحلیل فرکانسی سه بعدی با نرم‌افزار تحلیلی آباکوس تعیین گردید. تحلیل فرکانسی بر اساس فرکانس ارتعاشات تولیدی توسط مبدل ۳kW با فرکانس ۲۴۹۳۰Hz انجام گرفت. با در نظر گرفتن طول مجموعه‌ی سنبه‌ها و تقویت‌کننده‌ها به اندازه $\frac{3\lambda}{2}$ (طول موج ارتعاشات فراصوتی = λ) یعنی فاصله از محل گرفته‌شدن تقویت‌کننده بالایی تا محل گرفته‌شدن تقویت‌کننده پایینی، ابعاد تقویت‌کننده‌ها و سنبه‌ها بر اساس تحلیل مودال بدست آمد. در این شبیه‌سازی، المان‌های مش‌بندی برای تقویت‌کننده، سنبه و نمونه مطابق جدول ۱ انتخاب شد.

جدول ۱- مشخصات مواد استفاده شده برای قطعات در شبیه‌سازی نرم افزار آباکوس

| نام قطعه | نوع المان | شکل المان | تابع شکل المان |
|-------------|-----------|-----------|----------------|
| تقویت‌کننده | C3D10 | چهار ضلعی | مربعی |
| سنبه | C3D8R | شش ضلعی | خطی |
| نمونه | C3D8R | شش ضلعی | خطی |

۱,۲۴۳۶ در حالت اولیه پس از خرید از تولیدکننده دارای سختی ۲۶HRC است که جهت بالا بردن سختی سنبه‌ها پس از ماشینکاری، روی آنها عملیات حرارتی انجام شد. مطابق توصیه شرکت سازنده (آساب^۱) و استانداردهای عملیات حرارتی، سنبه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۶۰°C نگهداشته و سپس در روغن کوئنچ شدند [۱۹]. پس از انجام مرحله سخت کردن، سختی سنبه‌ها به ۶۲HRC رسید. با توجه به عدم نیاز به این مقدار سختی و همچنین تردی و شکنندگی احتمالی سنبه‌ها در حین آزمون فشار، عملیات نرم‌سازی به وسیله تمپر کردن (بازپخت) نیز بر روی سنبه‌ها انجام شد و سنبه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۵۰۰°C نگهداشته شده و سپس در هوا خنک شدند. پس از تمپر شدن، سختی سنبه‌ها به ۵۱HRC رسید که قابل قبول و مورد انتظار بود.

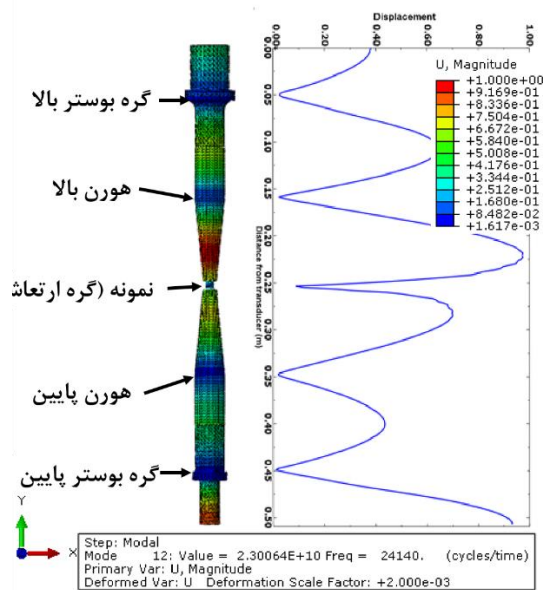
گیرنده‌های بالا و پایین و پایه اصلی که در قسمت زیرین قرار دارد از جنس ۱۵۰ VCN (3CrNiMo6) و سایر اجزای سیستم آزمون فشار از فولاد سازه‌ای ساخته شدند. این فولاد آلیاژی دارای استحکام تسلیم، استحکام کششی، انعطاف‌پذیری و مقاومت به شکست بالا است. جهت اطمینان از هم‌محوری اجزای ساخته شده با فک‌های دستگاه، از مکانیزم یاتاقان کروی (گوی و کاسه) برای انتقال نیرو از فک بالا به تجهیزات استفاده شده است؛ همچنین کلیه مراحل ساخت قطعات و تolerانس‌های هندسی مهم مطابق با استانداردهای مرتبط با آزمون فشار یعنی ASTM-E۲۰۹ و ASTM-E۹ انجام شد [۱۸].

پس از اعمال ارتعاشات فراصوتی به سیستم آزمون، با توجه به طراحی انجام شده و فرکانس تولیدکننده ارتعاشات (مبدل) تعدادی گره و شکم در سیستم ایجاد می‌شود. براساس تحلیل فرکانسی، نمونه آزمون فشار بر اساس فرکانس کاری می‌تواند در محل گره و یا شکم ارتعاشی قرار گیرد که با طراحی سنبه‌ها بر اساس قرار گرفتن سنبه‌ها در این دو موقعیت، هر دو حالت بررسی و مقایسه شد.

در این آزمون، توان و فرکانس فراصوتی به عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شد و ارتفاع سنبه و نمونه که منجر به تغییر حالت قرارگیری نمونه در مسیر ارتعاشی (گره یا شکم) می‌شود، به عنوان پارامتر متغیر مدنظر قرار گرفت.

² Resonance

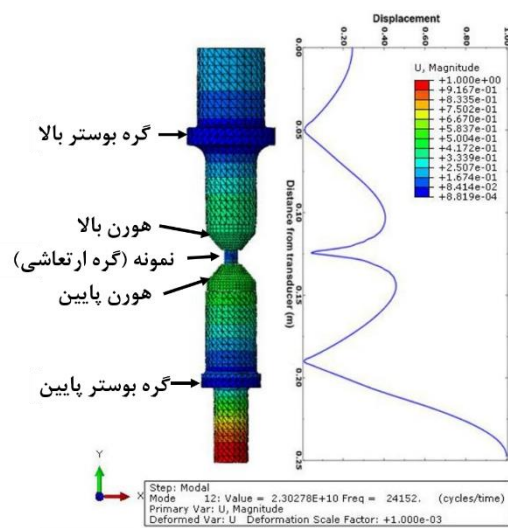
¹ ASSAB



شکل ۵- مجموعه اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه $\text{Ø}10\text{H}10$ در وضعیت گره ارتعاشی

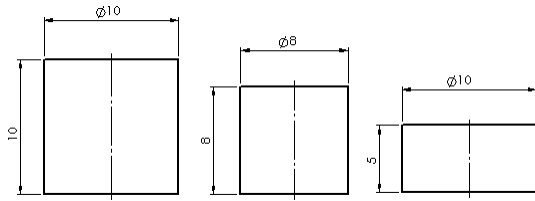
برای قرارگیری نمونه‌ها در موقعیت شکم ارتعاشی، در این حالت انتهای تقویت‌کننده پایین، وسط نمونه و محل اتصال مبدل با تقویت‌کننده بالا شکم و محل اتصال تقویت‌کننده‌ها با گیرنده آنها گره در نظر گرفته شد که موقعیت گره و شکم‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. نقشه سنبه‌های ساخته شده در شکل ۷، نقشه بوستر آزمون فشار در شکل ۸ و نقشه نمونه‌های آزمون فشار در شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ تصویر نمونه‌های آزمون نشان داده شده است؛ همچنین تصویر یکی از نمونه‌های بعد از اجرای آزمون ارائه گردیده است.

پس از تحلیل مودال کل مجموعه، وضعیت گره‌ها و شکم‌ها و همچنین فرکانس تشدید مطابق شکل ۴ بدست آمد. در این شکل، شکل مود ارتعاشی در دو سنبه شکل دهی و نمونه نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، فرکانس تشدید برابر 24152Hz است که نزدیک به فرکانس ارتعاشات رزونانس تولید شده توسط مبدل است. قطر و ارتفاع نمونه برابر ۸ میلی‌متر و نسبت قطر به طول در طراحی نمونه‌ها یک در نظر گرفته شد.



شکل ۴- مجموعه اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه $\text{Ø}8\text{H}8$ در وضعیت گره ارتعاشی

همچنین سنبه دیگری با در نظر گرفتن طول مجموعه به اندازه $5\lambda/2$ طراحی و ساخته شد که وضعیت گره‌ها و شکم‌ها و همچنین فرکانس تشدید در شکل ۵ مشخص شده است. طول و قطر نمونه در این حالت ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.



شکل ۹- نقشه نمونه‌های آزمون فشار



نمونه Ti-6Al-4V
با ابعاد Ø10H5
کونچ شده

نمونه Ti-6Al-4V
با ابعاد Ø10H10
آنیل شده

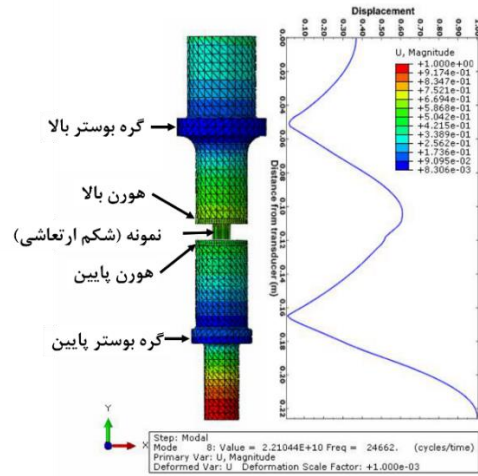
نمونه Ti-6Al-4V
با ابعاد Ø8H8
بدون عملیات حرارتی



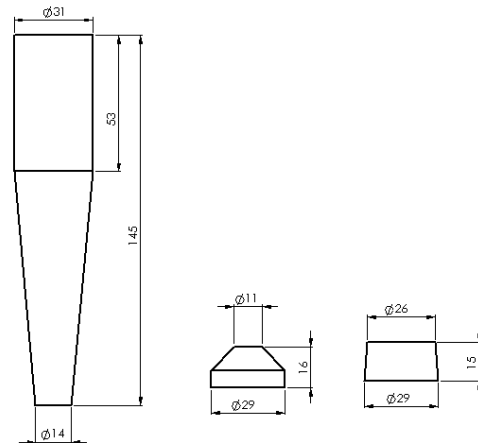
شکل ۱۰- تصویر نمونه‌های آزمون قبل و بعد آزمون

۴- ارزیابی تجربی طراحی

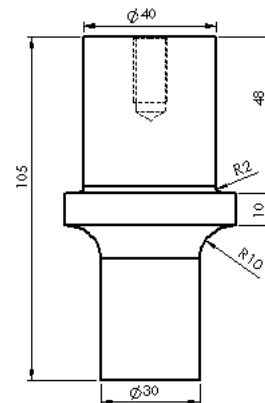
در طراحی مجموعه ارتعاشی برای اطمینان از کارکرد مناسب در حین بارگذاری، تلاش می‌شود تا پارامتر کیفیت یا به اصطلاح Q-factor مقدار بالایی داشته باشد. این پارامتر توسط دستگاه امیدانس آنالایزر اندازه‌گیری می‌شود. هر چه میزان منحنی تیزتر باشد، ضریب کیفیت بالاتر و هرچه منحنی پهن‌تر باشد ضریب کیفیت پایین است و احتمال خراج شدن از محدوده ارتعاشی در اثر شیف‌ت فرکانسی کمتر است. به عبارتی در حین کارکرد سیستم ارتعاشی ممکن است در اثر گرمایش یا افزوده شدن بار به سیستم، شیف‌ت فرکانسی در مجموعه ایجاد گردد که از این منظر وجود نمودار پهن مفید خواهد بود؛ همچنین با استخراج منحنی، جریان بر حسب فرکانس در محدوده فرکانس رزونانسی مدنظر، می‌توان کیفیت طراحی و پیک منحنی را مشاهده نمود (شکل ۱۱). در صورت وجود پیک اضافه که در حین بارگذاری منجر به تغییر شکل مود ارتعاشی گردد، این پیک باید در نمودار جریان بر حسب فرکانس باید دیده شود که در منحنی ارائه شده وجود ندارد و نشان از



شکل ۶- مجموعه اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه‌های Ø10H5 و Ø10H10 در وضعیت شکم ارتعاشی

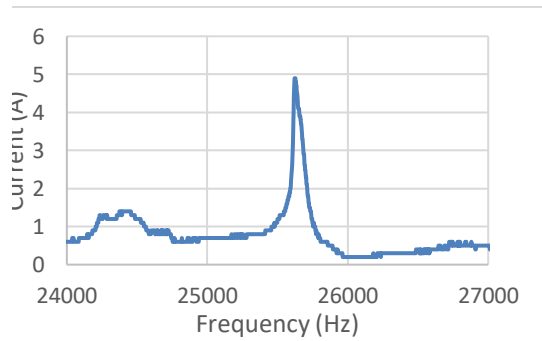


شکل ۷- نقشه سنبه‌های آزمون فشار



شکل ۸- نقشه بوستر آزمون فشار

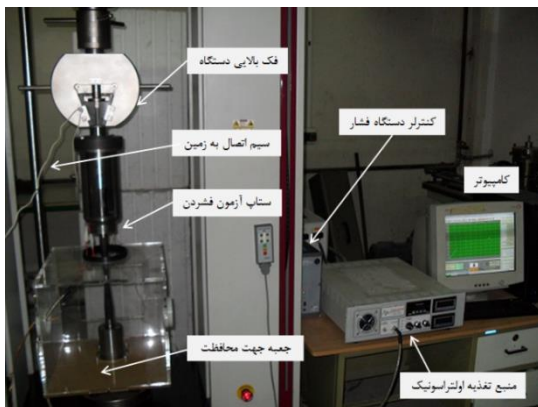
این صورت بهره‌گیری از چنین منطقی در منبع تغذیه، می‌توان از سیستمی با Q-Factor بالا استفاده کرد و بالا بودن ضریب کیفیت، بسیار مطلوب است. مضاف بر اینکه در این حالت نباید در نزدیکی فرکانس مرکزی، فرکانس‌های مزاحم وجود داشته باشند.



شکل ۱۱- منحنی جریان بر حسب فرکانس

۵- آزمون تجربی

سیستم ساخته شده بر روی دستگاه کشش-فشار یونیورسال DTU-۹۰۰ (حداکثر نیروی ۵۰ تن، حداقل/حداکثر سرعت بارگذاری ۰/۰۱ و ۳۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و اکستنسومتر انکودری با تفکیک پذیری ۰/۱ میکرومتر) نصب شد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. اجزای اصلی دستگاه شامل فک بالا، کنترلر دستگاه کشش-فشار و کامپیوتر جهت تنظیمات آزمون، ذخیره و نمایش نتایج آزمون می‌باشند. فک پایین با چیدمان آزمون جایگزین شده است. در شکل ۱ نیز نحوه قرارگیری نمونه آزمون فشار بین سنبه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۲- چیدمان آزمون فشار تحت ارتعاشات فراصوتی

طراحی مناسب مجموعه دارد. به عبارتی در تطبیق منحنی امپدانس حاصل از امپدانس آنالایزر با منحنی جریان، موقعیت پیک ارتعاشی معادل کمترین امپدانس و حداکثر جریان الکتریکی می‌باشد که در طراحی مجموعه ارتعاشی لحاظ گردیده است. منحنی جریان بر حسب فرکانس با استفاده از منبع تغذیه فراصوت ساخت شرکت فراصوت تجهیز ایرانیان استخراج می‌شود.

این منحنی همچنین برای بررسی صحت طراحی استفاده می‌شود. موقعیت پیک منحنی جریان نشانگر فرکانس رزونانس مکانیکی مجموعه است که باید با فرکانس رزونانس طراحی المان محدود همخوانی داشته باشد؛ یعنی در طراحی ارتعاشی مجموعه هدف دستیابی به شکل مود مطلوب در فرکانس رزونانس مطلوب است؛ اگر پیک منحنی نزدیک فرکانس رزونانس مطلوب طراحی المان محدود باشد و نیز پیک‌های مزاحم در حوالی پیک اصلی وجود نداشته باشد، یعنی این مطلوب حاصل شده است. در این طراحی، فرکانس رزونانس تجربی به فرکانس رزونانس المان محدود همخوانی مطلوبی دارد؛ از اینرو، شکل مود مدنظر و نکات گره و شکم باید در این فرکانس حادث شود. با استفاده از تماس یک ابزار و بررسی صدای ارتعاشی (وجود ارتعاش در نقاط شکم و نبود ارتعاش در نقاط گره) نیز در عمل می‌توان موقعیت‌های گره و شکم را تشخیص داد؛ همچنین در صورتی که طراحی نامطلوب بود و گره ارتعاشی که محل گرفتن مجموعه است، با المان محدود تطابق نداشت، فرکانس رزونانس مجموعه به دلیل اضافه شدن بار، تغییر قابل توجهی می‌کرد.

همچنین از رویه‌های دیگری نیز می‌توان برای صحت‌گذاری طراحی استفاده نمود. نظیر تعیین دامنه ارتعاشی در موقعیت‌های مختلف سنبه با استفاده از دامنه‌سنج التراسونیک که البته این رویه توسط نویسندگان استفاده نگردیده است و از روش ذکر شده در فوق، استفاده شده است. البته علاوه بر رعایت اصول فوق در طراحی سیستم مکانیکی التراسونیک، در صورت بروز شیفت فرکانسی در مجموعه، امکان ردیابی آن توسط منبع تغذیه نیز وجود دارد. منبع تغذیه التراسونیک بر مبنای ردیابی زاویه فاز بین جریان و ولتاژ عمل می‌کند و با حالت خودتنظیم، سعی در یافتن فرکانس جدید کاری و تطبیق مجموعه الکتریکی با مجموعه مکانیکی می‌نماید. در

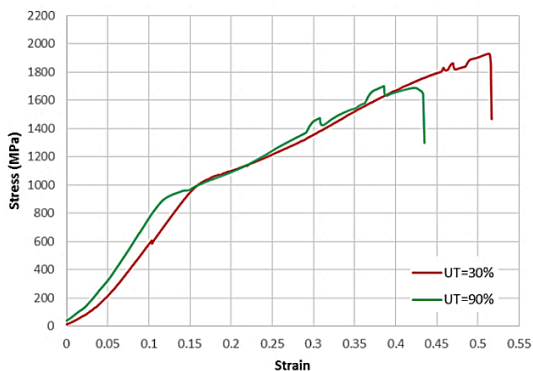
ارتعاشات فراصوتی را به آن متصل کرده و همزمان نمونه فشرده می‌شود و تا انتهای آزمون ارتعاشات فراصوتی روی نمونه اعمال می‌شود. مقدار توان نامی منبع تغذیه $500W$ است که درصدهای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ به ترتیب معادل $150W$ ، $300W$ و $450W$ نامی می‌باشند.

۶- بحث و نتایج

در این بخش داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی ارائه و استدلال‌های مربوط به رفتار مواد ارائه می‌شود.

۶-۱- نمودار تنش- کرنش تحت ارتعاشات فراصوت

جهت مشاهده اثر قطع و وصل کردن ارتعاشات فراصوتی بر روی نمودار منحنی تنش-کرنش، در حین آزمون فشار نمونه‌های تیتانیومی با ابعاد $\emptyset 8 \times 8$ ، ارتعاشات فراصوتی در نواحی الاستیک و پلاستیک چند بار قطع و سپس وصل شد. منحنی تنش-کرنش حاصل از انجام این آزمون‌ها در شکل ۱۳ آمده است. از منحنی‌ها مشخص است که با اعمال ارتعاشات فراصوتی نمودار تنش-کرنش به سمت پایین انتقال پیدا می‌کند و تنش کاهش می‌یابد و با قطع ارتعاشات فراصوتی نمودار به سمت بالا پرش پیدا می‌کند و تنش افزایش می‌یابد. با افزایش توان ارتعاشات فراصوتی میزان پرش نمودار و کاهش و افزایش تنش ناشی از اثر ارتعاشات فراصوتی بیشتر می‌شود.



شکل ۱۳- اثر قطع و وصل کردن ارتعاشات فراصوتی در حین انجام آزمون فشار نمونه $Ti-6Al-4V$ و ابعاد $\emptyset 8 \times 8$ با سنبه‌های شماره ۱ بر منحنی تنش-کرنش (نمونه در محل گره ارتعاشی)

منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمون فشار نمونه $Ti-6Al-4V$ با ابعاد $\emptyset 8 \times 8$ توسط سنبه شماره ۱ با و

نمونه‌های فشار آلیاژ $Ti-6Al-4V$ پس از خرید برای استاندارد نمودن و یکسان‌سازی ساختار آن، تحت عملیات حرارتی قرار گرفت [۲۰]. برای ایجاد ساختار ریزدانه و مارتنزیتی، پس از نگهداشتن ماده در دمای تک فازی بتا به مدت یک ساعت، به سرعت و در آب کوئنچ گردید که در نتیجه دانه‌های ریز آلفا ثانویه در زمینه بتا اولیه قرار می‌گیرند.

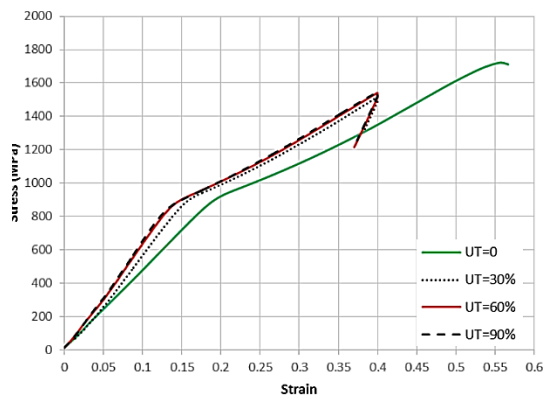
مسئله حائز اهمیت در انتخاب ابعاد نمونه‌ها این است که هر چقدر طول نمونه‌ها بزرگتر باشد، تغییر طول آن‌ها پس از آزمون بیشتر خواهد بود و تغییر طول زیاد کل مجموعه در حین آزمون می‌تواند فرکانس طبیعی سیستم را تغییر دهد و آن را از حالت رزونانس خارج کند؛ بنابراین طول نمونه‌ها بایستی حتی الامکان کوچک باشد.

برای آزمون فشار در دمای محیط، سه نوع نمونه با قطر و طول ۸ میلی‌متر، قطر و طول ۱۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ و طول ۵ میلی‌متر انتخاب و ساخته شده است. دلیل انتخاب این ابعاد امکان اعمال فشار توسط سنبه بالا و پایین بر روی نمونه فشار می‌باشد؛ زیرا نمونه پس از فشرده‌شدن دچار افزایش قطر می‌شود و باید به گونه‌ای باشد که سنبه تا مراحل پایانی فشار سطح آن را در بر داشته باشد.

نرخ کرنش‌های معمول برای انجام آزمون‌های بررسی رفتار مواد برابر 0.001 ، 0.01 و 1 بر ثانیه می‌باشند [۲۱-۲۳]. با افزایش نرخ کرنش در حین آزمون، نمونه تنش تسلیم بیشتری از خود نشان می‌دهد؛ اما کرنش نمونه تا زمان شکست کاهش می‌یابد. برای انجام آزمون‌های فشار براساس تحقیقات منابع و توصیه استانداردهای فشار از پیشروی فک دستگاه فشار با سرعتی متناسب با نرخ کرنش 0.001 بر ثانیه استفاده شد. با توجه با طول گیج نمونه‌های انتخابی که ۵، ۸ و ۱۰ میلی‌متر بود؛ لذا سرعت پیشروی فک دستگاه برای این نمونه‌ها به ترتیب بر روی 0.03 ، 0.48 و 0.6 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد که این سرعت پیشروی و نرخ کرنش برای تمام آزمون‌ها ثابت در نظر گرفته شد.

اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه‌ها به دو صورت انجام گرفت. حالت اول این است که نمونه در معرض فشار قرار می‌گیرد و در اواسط آزمون، ارتعاشات فراصوتی به نمونه اعمال شده و سپس قطع می‌شود که در این صورت سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی پسماند آکوستیکی در نمونه به وجود می‌آید. در حالت دوم می‌توان از همان ابتدا قبل از اعمال نیرو به نمونه،

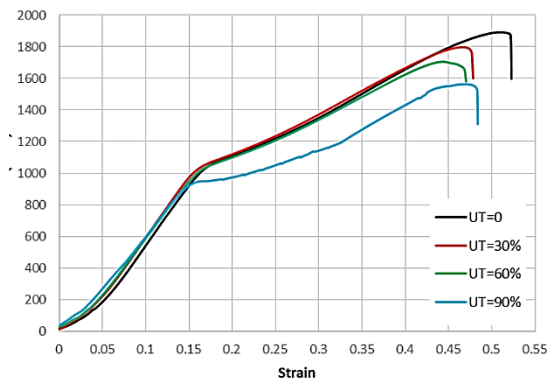
با تغییر توان ارتعاشات فراصوتی منحنی تنش- کرنش تغییر چندانی نکرده است و تنش نهایی و کرنش در زمان شکست در توان‌های مختلف برابر شده است. دلیل این نتایج می‌تواند بلند بودن سنبه‌ها باشد که منجر به اتلاف انرژی فراصوتی در سنبه‌ها شده و با توجه به اینکه جنس این سنبه‌ها فولاد است و ضریب میرایی امواج در فولادها بالا است، ارتعاشات در آنها میرا گردد. ضمناً مشاهده می‌شود که تنش سیلان در منحنی‌های آزمون فشار با ارتعاشات فراصوتی بیشتر از آزمون فشار بدون ارتعاشات فراصوتی است.



شکل ۱۵- منحنی تنش-کرنش آزمون فشار ۶Al-۴V- Ti با ابعاد $\varnothing 10 \times H10$ با سنبه‌های شماره ۲ (نمونه در محل گره ارتعاشی)

در سنبه شماره ۳ با موقعیت شکم ارتعاشی، نمونه‌های تیتانیومی با ابعاد $\varnothing 10 \times H10$ میلی‌متر یکبار بدون اعمال ارتعاشات فراصوتی و دو بار همراه با اعمال ارتعاشات فراصوتی در حین آزمون تا نقطه شکست فشرده شد. منحنی تنش-کرنش حاصل از انجام این آزمون‌ها در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه منحنی تنش-کرنش با افت مواجه می‌شود و تنش نهایی در زمان شکست کمتر از حالت بدون ارتعاشات فراصوتی می‌شود.

بدون اعمال ارتعاشات فراصوتی در شکل ۱۴ آمده است. همانطور که از شکل مشخص است، با اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه Ti-6Al-4V منحنی تنش-کرنش با افت مواجه شده و تنش نهایی و کرنش در زمان شکست کمتر از حالت بدون ارتعاشات فراصوتی شده است. با افزایش توان ارتعاشات فراصوتی تنش تسلیم نیز کاهش یافته است که در توان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد این کاهش به ترتیب برابر ۳/۵۹، ۳/۸۷ و ۱۴/۸۳ درصد است. کاهش استحکام نهایی در توان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد به ترتیب برابر ۵، ۹/۸۷ و ۱۷/۳۶ درصد است. مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش تنش سیلان، در بیشترین توان ارتعاشی اتفاق افتاده است. اعمال ارتعاشات فراصوت منجر به کاهش کرنش شکست و به عبارتی کاهش انعطاف‌پذیری نمونه شده است.



شکل ۱۴- منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون فشار نمونه ۶Al-۴V- Ti و ابعاد $\varnothing 8 \times H8$ با سنبه شماره ۱ (نمونه در محل گره ارتعاشی)

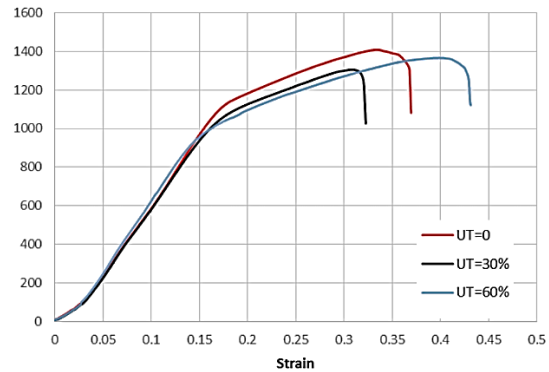
در سنبه شماره ۲، در موقعیت گره ارتعاشی، نمونه‌های تیتانیومی با ابعاد $\varnothing 10 \times H10$ یکبار بدون اعمال ارتعاشات فراصوتی و چند بار همراه با اعمال ارتعاشات فراصوتی در حین آزمون تا نقطه شکست فشرده شد. منحنی تنش-کرنش حاصل از انجام این آزمون‌ها در شکل ۱۵ آمده است. همانطور که مشخص است، پس از اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه ۶Al-4V-Ti منحنی تنش-کرنش به سمت چپ انتقال یافته و تنش تسلیم به میزان اندکی کاهش یافته است. میزان کاهش تنش تسلیم، ۳/۲۴، ۵/۲۵، ۵/۸۰ درصد به ترتیب برای توان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد است؛ همچنین کرنش در زمان شکست به میزان قابل توجهی کاهش یافته است (کاهش حدود ۳۰ درصد)؛ اما

با توجه به نتایج آزمون‌های فشار، می‌توان اثر ارتعاشات فراصوتی بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های آلیاژ تیتانیوم ۴۷-Ti-۶Al را در مواردی از قبیل تنش تسلیم، استحکام نهایی و کرنش در زمان شکست بررسی کرد. نتایج حاصل از انجام این آزمون‌ها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. شایان ذکر است که در برخی از آزمون‌ها هدف بررسی اثر قطع و وصل نمودن ارتعاشات فراصوتی بر منحنی تنش-کرنش بوده است و با توجه به اینکه در قسمتی از زمان آزمون فشار ارتعاشات فراصوتی قطع بوده است، نتایج آن‌ها قابل مقایسه با سایر آزمون‌های فشار نبوده است؛ زیرا در بقیه آزمون‌ها ارتعاشات فراصوتی در کل مدت انجام آزمون فشار وصل بوده است. به همین دلیل، این آزمون‌ها در این جدول قید نشده است. ضمناً در شکل ۱۷ به علت اینکه آزمون فشار منجر به شکستن نمونه‌ها نشد، لذا میزان تنش در یک کرنش مشخص (۴۰٪) با یکدیگر مقایسه شده است.

در جدول ۲ نتایج حاصل از آزمون‌های فشار تحت ارتعاشات فراصوتی ارائه شده است.

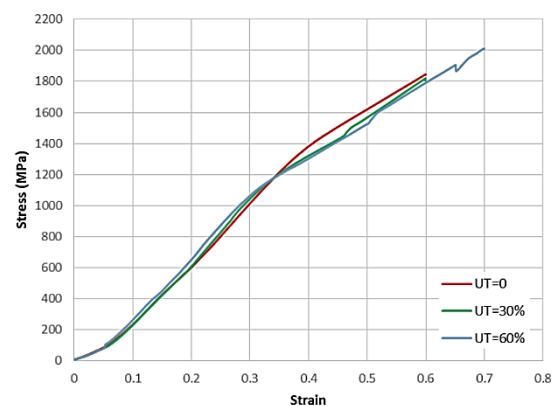
جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون فشار نمونه‌های ۴۷-Ti-۶Al

| Ti-۶Al | | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| کرنش نهایی (%) | تنش نهایی (MPa) | تنش تسلیم (MPa) | توان ارتعاشات فراصوت | جزئیات |
| ۵۳ | ۱۸۵۴ | ۱۰۸۵ | بدون ارتعاشات | نمونه Ø۸H۸ |
| ۵۰ | ۱۷۶۲ | ۱۰۴۶ | توان ۳۰٪ | (نمونه در محل گره ارتعاشی) |
| ۴۸ | ۱۶۷۱ | ۱۰۴۳ | توان ۶۰٪ | |
| ۴۹ | ۱۵۳۲ | ۹۲۴ | توان ۹۰٪ | |
| ۵۸ | ۱۶۸۹ | ۸۹۶ | بدون ارتعاشات | نمونه Ø۱۰H۱۰ |
| ۴۰ | ۱۴۸۷ | ۸۶۷ | توان ۳۰٪ | (نمونه در محل گره ارتعاشی) |
| ۴۰ | ۱۵۱۲ | ۸۴۹ | توان ۶۰٪ | |
| ۴۰ | ۱۵۱۷ | ۸۴۴ | توان ۹۰٪ | |
| ۳۵ | ۱۶۰۳ | ۱۳۴۳ | بدون ارتعاشات | نمونه Ø۱۰H۱۰ |
| ۳۴ | ۱۵۶۱ | ۱۳۴۱ | توان ۳۰٪ | (نمونه در محل شکم ارتعاشی) |
| ۳۳ | ۱۶۰۱ | ۱۳۴۳ | توان ۶۰٪ | |



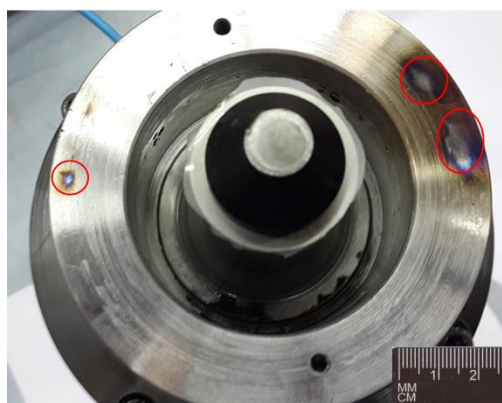
شکل ۱۶- منحنی تنش-کرنش حاصل از انجام آزمون فشار نمونه ۴۷-Ti-۶Al و ابعاد Ø۱۰H۱۰ با سنبه‌های شماره ۳ (نمونه در محل شکم ارتعاشی)

با استفاده از سنبه شماره ۳ و در موقعیت شکم ارتعاشی، نمونه‌های تیتانیومی با ابعاد Ø۱۰H۵ یکبار بدون اعمال ارتعاشات فراصوتی و دو بار همراه با اعمال ارتعاشات فراصوتی در حین آزمون تا نقطه شکست فشرده شد. منحنی تنش-کرنش حاصل از انجام این آزمون‌ها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که منحنی‌های تنش-کرنش نشان می‌دهند، با اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه، منحنی تنش-کرنش با افت مواجه می‌شود و تنش تسلیم آن نیز کمتر از حالت بدون ارتعاشات فراصوتی می‌شود. با توجه به اینکه نسبت طول به قطر این نمونه‌ها کم بود، آزمون تا کرنش ۷۰٪ نیز ادامه یافت، ولی شکستی در نمونه‌ها رخ نداد.



شکل ۱۷- منحنی تنش-کرنش حاصل از انجام آزمون فشار نمونه ۴۷-Ti-۶Al و ابعاد Ø۱۰H۵ با سنبه‌های شماره ۳ (نمونه در محل شکم ارتعاشی)

ترک‌های ریز موجود در تجهیزات آزمون که در طی فرایند تولید در آنها ایجاد شده بود، می‌توانند انرژی فراصوتی را جذب کرده و منجر به گرم شدن آن ناحیه شوند. این گرم شدن می‌تواند تا جایی پیش رود که با اعمال نیرو بصورت همزمان، ترک رشد کرده و بزرگ‌تر شود؛ همچنین با توجه به اینکه این ترک‌ها محل تماس دو سطح فلز می‌باشند، ارتعاشات فراصوتی می‌تواند در آن محل موجب نوعی جوشکاری اصطکاکی توأم با ارتعاشات فراصوتی شود. در شکل ۱۸ این ترک‌ها که رشد نموده و با ایجاد حرارت فراوان در سیستم موجب توقف آزمون شد، نشان داده شده است. این قطعه همان محفظه انتقال دهنده ارتعاشات و محافظ مبدل (شکل ۱۸) است که با روش جوشکاری تولید شده است. ایجاد حرارت موضعی یکی از پدیده‌های مهم در بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی تحت ارتعاشات توان بالای فراصوتی است [۲۷-۲۹].



شکل ۱۸- ترک‌های رشد کرده ناشی از اعمال ارتعاشات فراصوتی به تجهیزات آزمون

به همین جهت سنبه‌های با طول بیشتر و زاویه رأس مخروط کمتر طراحی و ساخته شد.

در طراحی سنبه شماره ۲، با توجه به اینکه جنس سنبه‌های ساخته شده از فولاد سخت ۱/۲۴۳۶ است و اصولاً فولادها به علت بالا بودن ضریب میرایی امواج صوتی در آنها، انتقال دهنده خوبی برای ارتعاشات فراصوتی نیستند، لذا با افزایش طول سنبه‌ها میزان اتلاف ارتعاشات فراصوتی در آن بیشتر می‌شود. همانطور که قبلاً بیان شد، در سنبه شماره ۲ که طول آن ۱۴ سانتی‌متر است، اگرچه ارتعاشات فراصوتی به نمونه منتقل می‌شود (شکل ۱۲)، اما اثر آن کم بوده و به علت

با توجه به داده‌های آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه‌های آلیاژ تیتانیوم ۶Al-۴V-Ti در حین فشرده‌شدن، ماده زودتر به تسلیم می‌رسد. همچنین مقایسه ناحیه پلاستیک منحنی‌ها نشان می‌دهد که تنش سیلان ماده با اعمال ارتعاشات فراصوتی کاهش می‌یابد که مطابق آنچه محققان قبلی مانند تیاپونینا [۲۴]، نروبای [۲۵] و هوانگ [۲۶] بیان کرده‌اند، دلیل کاهش تنش سیلان در ماده ایجاد عیوب و تخلخل در ماده و لغزش آسان صفحات بر روی یکدیگر است. به همین دلیل ماده تنش نهایی کمتری نیز از خود نشان می‌دهد.

از مقایسه کرنش ماده قبل از شکست نیز می‌توان نتیجه گرفت که در اکثر نمونه‌ها میزان شکل‌پذیری و فشرده‌شدن نمونه‌ها کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش توان ارتعاشات فراصوتی کرنش نمونه قبل از شکست کاهش بیشتری پیدا می‌کند. دلیل این امر نیز می‌تواند تشکیل نابجایی‌ها در ماده و عیوب به وجود آمده در اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی به نمونه باشد.

۲-۶- بررسی اثر شکل سنبه

برای بررسی اثر شکل سنبه بر انتقال ارتعاشات فراصوتی به ماده در حین آزمون فشار، ۳ سنبه با شکل‌های مختلف و بر اساس قرارگیری نمونه در موقعیت گره یا شکم طراحی و ساخته شد. این سنبه‌ها را می‌توان از ۳ جنبه مختلف بررسی کرد و اثر هر پارامتر در میزان انتقال ارتعاشات فراصوتی به نمونه‌ها را در این ۳ سنبه مقایسه کرد. این ۳ پارامتر عبارتند از طول سنبه، گره یا شکم بودن نمونه در چیدمان آزمون و شیب قسمت مخروطی سنبه.

در سنبه شماره یک نمونه در موقعیت گره قرار می‌گیرد. این چیدمان ارتعاشات فراصوتی را به خوبی به نمونه‌ها انتقال می‌دهد، ولی به علت زیاد بودن زاویه قسمت مخروطی آن (راس مخروط) امواج فراصوتی با برخورد به سطوح سنبه و انعکاس آنها، برگشت داده می‌شوند. این برگشت امواج موجب آسیب وارد شدن به مبدل می‌شود؛ زیرا ارتعاشات برگشتی به پیزوالکتریک‌ها منتقل می‌شود و موجب شکستن آنها می‌شود؛ همچنین دمای قطعه تطبیق مبدل و تقویت کننده بالایی با افزایش توان ارتعاشات فراصوتی می‌تواند بطور قابل توجهی افزایش یابد. برای مثال در حین آزمون فشار مشاهده شد که

۲) با اعمال ارتعاشات فراصوتی کرنش شکست نمونه کاهش می‌یابد و این مساله با افزایش توان ارتعاشات رابطه مستقیم دارد.

۳) با افزایش طول سنبه اگرچه برگشت امواج و اثرات تخریبی آن کاهش می‌یابد، ولی میرایی ارتعاشات فراصوتی افزایش می‌یابد.

۴) قرار دادن نمونه در محل شکم ارتعاشی باعث افزایش اثرپذیری آن از ارتعاشات فراصوتی می‌شود.

۵) ایجاد حرارت موضعی و افزایش دمای ماده و تجهیزات آزمون در توان‌های بالای فراصوتی مشاهده شده است.

مراجع

- [1] G. Welsch, R. Boyer, E.W. Collings, (1993) *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International.
- [2] A.R. Vahdati, M. Vahdati, (2018) *Experimental Analysis the Effect of Lubricant and Ultrasonic Excitation of Hemispherical-head Tool on the Vertical Component of Forming Force in SPIF*, J. SOLID FLUID Mech., 107-123 (In persian).
- [3] M. Sadeghi, A. Abdullah, A. Fallahi, R. Abedini, (2015), *Effect of ultrasonic vibrations on the activation, mobility and density of dislocations in metallic materials*, J. Sound Vib., (In persian)
- [4] Blaha F, Langenecker B (1955) *Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration*. *Naturwissenschaften* 42: 556-560.
- [5] Langenecker B (1966) *Effects of ultrasounds on deformation characteristics of metals*. *IEEE Trans. Son Ultrason* SU-13: 1-8.
- [6] Nerubai M.S (1987) *Effect Of Ultrasonic Vibrations On The Mechanical Properties Of Difficult-To Deform Materials*. *Kuibyshev Polytechnic Institute*. Translated from *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka, Metallov* 4: 10-13.
- [7] Yao Zh, Kim G, Faidley L, Zou Q, Mei D, Chen Z (2012) *Acoustic softening and residual hardening in aluminum: Modeling and experiments*. *Int J Plast* 39: 75-87.
- [8] Yao Zh, Kim G, Faidley L, Zou Q, Mei D, Chen Z (2013) *Acoustic Softening and Hardening of Aluminum in High-Frequency Vibration-Assisted Micro/Meso Forming*. *Mater Manuf Process* 28(5): 584-588.
- [9] Wen T, Wei L, Chen X, Pei Ch (2011) *Effects of ultrasonic vibration on plastic deformation of AZ31 during the tensile process*. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 18: 70-76.

اتلاف انرژی فراصوتی، تغییر توان ارتعاشات فراصوتی در آزمون‌های مختلف، تاثیر مهمی بر منحنی‌های تنش-کرنش نمی‌گذارد.

در سنبه شماره ۳، جهت بررسی و مقایسه اثر قرارگیری نمونه در موقعیت گره یا شکم ارتعاشی بر روی منحنی‌های تنش-کرنش، از پولکی‌های فشار (سنبه شماره ۳) استفاده شد. این پولکی‌ها با توجه به داشتن طول کم موجب کاهش اتلاف انرژی فراصوتی در مسیر انتقال به نمونه می‌گردند. همچنین با توجه به اینکه نمونه در این چیدمان در موقعیت شکم ارتعاشی قرار می‌گیرد؛ لذا دامنه نوسانات ارتعاشات فراصوتی در محل قرارگیری نمونه زیاد است. انرژی نوسانات با دامنه بالا که عامل اصلی حرکت نایبایی‌ها و صفحات لغزشی در ماده است، باعث کاهش نیروی لازم جهت تغییر شکل ماده می‌شود و با ایجاد حرارت موضعی، در محل ناپیوستگی‌ها و ترک‌های ریز موجب کاهش تنش تسلیم ماده می‌شود. همانطور که در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نشان داده شده است، اثر ارتعاشات فراصوتی بر روی منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون فشار نمونه‌های ۴۷-Ti-۶Al قابل توجه است.

۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بر روی نمونه‌های آلیاژ تیتانیوم آزمون‌های فشار توأم با اعمال ارتعاشات فراصوتی انجام شد. جهت انجام این آزمون‌ها، تجهیزاتی ساخته شد که ارتعاشات فرکانس بالای فراصوتی را به صورت طولی و همزمان به نمونه‌های تیتانیوم ۴۷-Ti-۶Al منتقل کند و ضمناً این ارتعاشات به دستگاه کشش-فشار منتقل نشود. با انجام آزمون فشار بر روی نمونه‌های ۴۷-Ti-۶Al با ابعاد و سنبه‌های مختلف، اثر شکل سنبه بر انتقال ارتعاشات فراصوتی به ماده و اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی و توان ارتعاشات در این پژوهش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

مهمترین مشاهدات و نتایج حاصل از اعمال ارتعاشات فراصوتی به آلیاژ تیتانیوم ۴۷-Ti-۶Al در حین آزمون فشار را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد.

۱) با اعمال ارتعاشات فراصوتی استحکام تسلیم و تنش سیلان نمونه کاهش می‌یابد و نمونه راحت‌تر و با نیروی کمتری شکل داده می‌شود.

- [21] Babu B (2008) Physically Based Model for Plasticity and Creep of Ti-6Al-4V, Licentiate Thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of Technology.
- [22] Prasad Y.V.R.K, Seshacharyulu T, Medeiros S. C, Frazier W, G (2001) A Study of Beta Processing of Ti-6Al-4V: Is it Trivial?. *J Eng Mater Technol* 123: 355-360.
- [23] Seshacharyulu T, Medeiros S. C, Frazier W. G, Prasad Y.V.R.K. (2002) Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure. *Mater Sci Eng A* 325(1-2): 112-115.
- [24] Tyapunina N.A; Blagoveshehenskii V.V, Zinenkova G. M; Ivashkin, Yu A (1982) Characteristics of plastic deformation under the action of ultrasound, *Sov Phys J* 6: 118-128.
- [25] Nerubai M.S (1987) Effect of Ultrasonic Vibrations on The Mechanical Properties of Difficult-To Deform. *Met Sci Heat Treat* 4: 10-13.
- [26] Lum I, Huang H, Pequegnat A, Chang B. H, Mayer M, Du D, Zhou Y (2009) Influence of superimposed ultrasound on deformability of gold. *J. Appl. Phys.* 106: 1-6.
- [27] Abedini, R., et al. (2017). A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic Vibrations in Metal Forming. *Modares Mechanical Engineering* 16(10): 323-334.
- [28] Fartashvand, V., Abdullah, A., Sadough S.A (2017). Effects of high power ultrasonic vibration on the cold compaction of titanium. *Ultrasonics Sonochemistry* 36: 155-161.
- [29] Abedini, R., et al. (2017). Ultrasonic hot powder compaction of Ti-6Al-4V. *Ultrasonics Sonochemistry* 37: 640-647.
- [10] Fartashvand V, Abdulah A, Sadough S.A (2017) Investigation of Ti-6Al-4V alloy acoustic softening. *Ultrason Sonochem* 38: 744-749.
- [11] Liu T, Lin J, Guan Y, Xie zh, Zhu L, Zhai J (2018) Effects of ultrasonic vibration on the compression of pure titanium. *Ultrasonics* 89: 26-33.
- [12] Zhao J, Su H, Wu Ch (2020) The effect of ultrasonic vibration on stress-strain relations during compression tests of aluminum alloys. *J Mater Res Technol* 9(6): 14895-14906.
- [13] Dawson G.R, Winsper C.E, Sansome D.H (1970) Application of high- and low-frequency oscillations to the plastic deformation of metals. *Metal Form* 9: 254-261.
- [14] Endo T; Tasaki M; Kubo M; Shimada (1982) High temperature deformation of an Al-5 at% Mg alloy under combined high frequency stresses. *Trans. J. JIM* (46) 665-673.
- [15] Izumi O; Oyama K; Suzuki Y (1966) On the superimposing of ultrasonic vibration during compressive deformation of metals. *Trans Jpn Inst Met* 7 (3):158-161.
- [16] Winsper C.E, Sansome D.H (1968) The influence of oscillatory energy on the stresses during plastic deformation. *J Inst Metals* 96: 353-357.
- [17] Yao Ye, Pan Yue, Liu Shiqing (2020) Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review. *Ultrason Sonochem* 62: 104722.
- [18] ASTM Standard E9 (1989) Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. *ASTM Int* DOI: 10.1520/E0009-89E01
- [19] ASSAB XW-5, Uddeholm Sverker 3, www.assab.com.
- [20] Lütjering, G. and J. C. Williams (2003). *Titanium*, Springer.