

Utilization of Special Characteristics in the Manufacturing of Additive Manufacturing Parts for Precise Calibration of Ultrasonic Test Equipment

Mohammad Riahi, Hamidreza Javidrad*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Riahi@iust.ac.ir

Abstract

In order to utilize NDT methods to evaluate manufactured parts via Additive Manufacturing (AM), scales are needed to represent probable defects in the produced part. In light of common defects in AM produced parts (gas porosity, powder porosity lack of fusion, etc...) and difference in their forming mechanism with probable defects in parts manufactured via traditional means, using present calibration blocks are not very effective. In the presented paper herein, an innovative reference block with designated internal characteristics for the calibration of ultrasonic equipment has been designed and manufactured by SLM method. Then, it was tested by pulse-echo ultrasonic test method. To attain confidence in the precision and accuracy of designated characteristics, cutting of the part took place and their dimensions was measured by light microscope and their distance from free surface by micrometer. To obtain results indicated affirmation in dimensional accuracy and precision and hence their utilization as a reference block in BDT measurement was confirmed.

Keywords: Nondestructive Testing, Additive Manufacturing, Calibration Blocks, Precision Measurement.

به کارگیری ویژگی‌های خاص در ساخت قطعات تولید افزایشی برای کالیبراسیون دقیق تجهیزات آزمون فراصوتی

محمد ریاحی، حمیدرضا جاویدراد*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*Riahi@iust.ac.ir

چکیده

برای به کارگیری روش‌های آزمون غیرمخرب جهت ارزیابی قطعات تولید شده به روش تولید افزایشی، نیاز به سنجه‌هایی است که نماینده عیوب محتمل در قطعه مورد آزمون باشند. با توجه به عیوب رایج قطعات تولید افزایشی (تخلخل گازی، تخلخل پودری، عدم همجواری و غیره) و تفاوت مکانیزم شکل‌گیری آن‌ها با عیوب محتمل در قطعات سنتی، به کارگیری بلوک‌های کالیبراسیون موجود کاربرد موثری ندارند. در مقاله حاضر، یک نمونه بلوک مرجع ابتکاری با ویژگی‌های جانمایی شده داخلی برای کالیبراسیون تجهیزات فراصوتی طراحی و به روش ذوب انتخابی لیزری ساخته شد و مورد آزمون فراصوتی پالس-اکو تماسی قرار گرفت. برای حصول اطمینان از صحت و دقت ساخت ویژگی‌ها، برشکاری انجام و ابعاد ویژگی‌ها با میکروسکوپ نوری و فواصل آن‌ها از سطوح آزاد به کمک میکرومتر و کولیس اندازه‌گیری شد. نتایج، صحت و دقت ابعادی این نمونه را تصدیق و کاربرد آن را به عنوان بلوک مرجع آزمون‌های غیرمخرب تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: آزمون‌های غیرمخرب، تولید افزایشی، بلوک‌های کالیبراسیون، اندازه‌گیری دقیق

۱- مقدمه

شامل تخلخل (پودری و گازی)^۲، ترک، عدم همجواری و غیره رخ می‌دهد. این عیوب تاثیر منفی روی خواص مکانیکی قطعه داشته و موجب عدم کارایی آن در صنعت می‌شود [۵]. لذا قطعات تولیدی علاوه بر آزمون‌های دوره‌ای، نیازمند آزمون‌های مقدماتی نیز هستند.

آزمون‌های کنترل کیفی به دو صورت مخرب و غیرمخرب قابل انجام است که در این حوزه آزمون‌های غیرمخرب جایگاه ویژه‌ای دارند [۶]. از جمله آزمون‌های غیرمخرب پرکاربرد، آزمون فراصوت می‌باشد که در صنایع گوناگون به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. با این حال، فرایند آزمون و ارزیابی به دلیل زبری سطح بالا و پیچیدگی-های هندسی که بعضاً در قطعات تولید افزایشی وجود دارد، و وجود ناهمسانگردی ساختاری، با چالش‌هایی روبرو است [۸، ۹]. لذا امکان کپی برداری و پیاده سازی روش‌های آزمون مربوط به قطعات تولید سنتی مانند فورج به سادگی

تولید افزایشی، به فرایندهایی گفته می‌شود که طی آن‌ها، قطعه به صورت لایه لایه و مستقیماً از روی مدل کامپیوتری ساخته می‌شود. با گسترش تحقیقات در حوزه‌های گوناگون تولید افزایشی، این تکنولوژی جایگاه ویژه‌ای در صنایع هوافضا، صنایع دفاعی و پزشکی کسب کرده است [۱، ۲]. این تکنولوژی امکان تولید قطعاتی با پیچیدگی بالا را فراهم آورده که با فرایندهای سنتی ناممکن و یا بسیار دشوار بوده است و این امر، نقش کلیدی در کوتاه کردن فرایند تولید و صرفه‌جویی در مواد مصرفی دارد [۳، ۴]. از جمله فرایندهای رایج بر پایه تولید افزایشی، فرایند ذوب انتخابی لیزری^۱ است. برای ساخت قطعه با کیفیت بالا طی فرایند ذوب انتخابی لیزری، باید یک سری پارامترهای بهینه اتخاذ شود تا قطعه‌ای با خواص مکانیکی و ساختاری مطلوب حاصل گردد. در صورت عدم انتخاب پارامترهای بهینه، عیوبی

^۲ Gas porosity, unfused powder porosity

^۱ Selective Laser Melting (SLM)

عوامل مانع بکارگیری آن‌ها در صنایع نمی‌شود. به عبارت دیگر، هر عیبی لزوماً دلیل محکمی برای ریجکت کردن قطعا ساخته شده نمی‌باشد. نکته حائز اهمیت، شناخت میزان قابل قبول از حضور عیوب مختلف در قطعات تولید افزایشی است. این امر نیاز به توسعه استانداردهای صنعتی برای حدود مجاز از این عیوب و پروسه آزمون‌های دوره‌ای قطعات را متذکر می‌شود.

با استناد به مقالات اشاره شده، به نظر می‌رسد تولید افزایشی امکان تولید بلوک‌های مرجع برای کالیبراسیون تجهیزات آزمون فراصوت و رادیوگرافی را دارا می‌باشد. از طرف دیگر بلوک‌های مرجع برای کالیبراسیون تجهیزات آزمون فراصوت باید طی همان فرایند تولیدی قطعه مورد آزمون تولید شده [۱۷] و حاوی عیوب مصنوعی در موقعیت مورد نظر با ابعاد و هندسی طراحی شده باشند [۱۸]. در مقاله حاضر، یک نمونه بلوک مرجع ابتکاری با ویژگی‌های کاربردی جانمایی شده برای کالیبراسیون تجهیزات فراصوت طراحی و به روش ذوب انتخابی لیزری ساخته شد و مورد آزمون فراصوت پالس-اکو تماشای قرار گرفت. برای حصول اطمینان از صحت و دقت ساخت ویژگی‌ها، آزمون مخرب^۴ انجام گرفت و ابعاد ویژگی‌ها با میکروسکوپ نوری^۵ و فواصل آن‌ها از سطوح آزاد به کمک میکرومتر و کولیس اندازه‌گیری شد.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶L به ابعاد اسمی ۲۵×۳۵×۴۵ میلی‌متر به روش ذوب انتخابی لیزری ساخته شد (شکل ۱). برای ساخت نمونه از پارامترهای بهینه دستگاه استفاده شد تا دانسیته حداکثری حاصل شود و سیگنال برگشتی از عیوب جانمایی شده قابل تشخیص باشند. با این حال، قطعه ساخته شده مورد آزمون ارشمیدوس قرار گرفت و درصد تخلخل آن مشخص گردید. ضخامت هر لایه در طی ساخت ۳۰ میکرون در نظر گرفته شد. درون نمونه ساخته شده سه حفره استوانه‌ای عمودی کور و دو حفره مکعبی مایل کور به ابعاد مختلف در ارتفاع-

امکان‌پذیر نمی‌باشد [۱۰]. با این حال، تحقیقات متعددی به بررسی روش‌های گوناگون آزمون‌های غیرمخرب برای ارزیابی قطعات تولید افزایشی اختصاص یافته است. برای حصول اطمینان از صحت کارایی هر سیستمی برای آزمون غیرمخرب قطعات تولید افزایشی، باید قطعاتی حاوی عیوب معلوم مختص فرایندهای تولید افزایشی ساخته و آزمون شوند تا کالیبراسیون دستگاه برای انجام آزمون انجام گیرد [۱۱]. Everton و همکاران [۱۱، ۱۲] با بکارگیری روش فراصوت لیزری^۱ اقدام به ارزیابی عیوب سطحی و زیرسطحی در قطعات ذوب انتخابی لیزری از جنس Ti-6Al-4V کردند. آن‌ها بوسیله تغییر موضعی پارامترهای ساختی مانند فاصله پاس‌ها^۲ و سرعت اسکن^۳، محدوده‌ای معیوب در نزدیکی سطح قطعه ایجاد کردند و برای صحت سنجی عیب مصنوعی تولید شده نیز از آزمون رادیوگرافی استفاده کردند. نتایج تحقیقات راضی‌کننده نبوده و بیان گردید ایجاد عیب عمدی در قطعه کاری آسان نمی‌باشد؛ چرا که ممکن است در حین ساخت لایه‌های بعدی، آن فضاهای ایجاد شده ذوب شوند و ناحیه معیوب از بین برود. Cerniglia و همکاران [۱] قطعاتی از جنس اینکل ساختند و به دو روش تغییر ناگهانی پارامترهای ساخت و روش دریلکاری عیوب مصنوعی در نزدیکی سطح آزاد قطعات ایجاد کردند و قطعات را مورد آزمون فراصوت لیزری قرار دادند. حاصل یک عیب عدم همجواری بسیار کوچک از دید بازرسی کنترل کیفی قطعه پنهان بماند. لذا علاوه بر بازرسی حین و پس از تولید، بازرسی‌های دوره‌ای قطعات تولید شده در حین خدمت نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

با این وجود، این عیوب شبیه‌سازی شده تا چه حد به عیوب واقعی شبیه هستند؟ در واقع، تولید یک نوع عیب ایزوله که کاملاً مشابه عیب واقعی باشد کاری بسیار دشوار است [۱۵]. علاوه بر این، این تحقیقات صرفاً به آزمون و ارزیابی قطعات در حین یا پس از تولید محدود هستند. این در حالی است که قطعات تولیدی به روش‌های سنتی نیز همواره حاوی تعدادی میکروترک، تخلخل و ناخالصی هستند ولی این

¹ Laser Ultrasound Testing (LUT)

² Hatch space

³ Scan speed

⁴ Sectioning

⁵ Light optical microscopy (LOM)

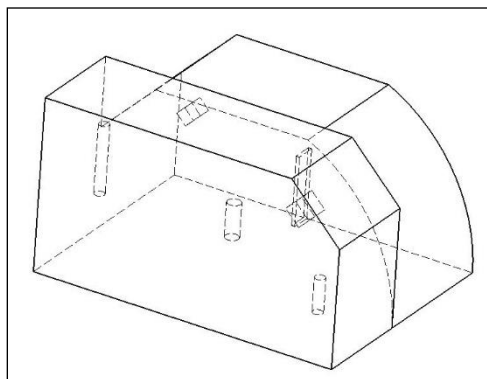
در راستاهای اصلی و سرعت موج عرضی تعبیه شده است. در این نمونه سه استوانه عمودی، برگرفته از سوراخ انتهایی^۲ (FBH) در بلوکهای کالیبراسیون ASTM هستند. این استوانهها در کالیبراسیون حساسیت نسبت به فاصله و اندازه عیب کاربرد گسترده دارند [۱۷]. علاوه بر این، این استوانهها بر خلاف بلوکهای ASTM که فقط امکان استفاده از یک جهت را دارند، این ویژگیها می‌توانند از دو راستا مورد استفاده قرار گیرند. در استاندارد ASTM E1158 به عنوان تلاشی برای تولید چنین امکانی یک نمونه بلوک به روش Diffusion Bonding Method تولید و در استاندارد گنجانده شده است [۱۷]. با این حال روش تولید افزودنی با قابلیت‌های نوین، ساخت چنین ویژگی‌هایی را بسیار آسان‌تر کرده است. علاوه بر این قابلیت‌ها، این ویژگیها امکان ارزیابی از جوانب بلوک را نیز دارا می‌باشند. به طوری که هر نوع پراب اعم از زاویه‌ای و نرمال، روی سطح قرار می‌گیرد و عملیات ارزیابی عیوب انجام می‌شود. نمونه ساخته شده با استوانه‌های جانمایی شده قابلیت‌هایی مشابه بلوک ASME را نیز دارا می‌باشد. این بلوک برای کنترل خطی بودن آمپلی فایر دستگاه و رسم نمودار DAC مرجع کاربرد دارد [۱۹].

بخش قطاع دایره‌ای برای تعیین شاخص^۳ پراب زاویه‌ای استفاده می‌شود که در بلوک معروف IIW V1 نیز به چشم می‌خورد. یک ناچ روی سطح بلوک نیز در طی فرایند تولید ایجاد شده است که برای کالیبراسیون شدت در پراب زاویه به منظور آزمون و ارزیابی اتصالات جوش و یا عیوبی که ممکن است در حین ترمیم قطعات به روش تولید افزایشی ایجاد شوند [۲۰] کاربرد دارد. اختلاف سطح ایجاد شده روی سطح بالایی نمونه به منظور کالیبراسیون رزولوشن پراب نرمال می‌باشد. در داخل این نمونه دو فضای خالی مکعبی قرار داده شده است که تحت زاویه ۴۵ درجه دوران داده شده‌اند. این دو فضای خالی به عنوان برگشت‌دهنده قوی امواج طولی، قابلیت استفاده برای کالیبراسیون تجهیزات فراصوت را دارند و نماینده بهتری از ترک‌های احتمالی ایجاد شده در حین فرایند ساخت و یا در طول عمر کاری قطعه می‌باشند. دلیل اینکه این ویژگیها با زاویه ۴۵

^۲ Flat bottom hole (FBH)

^۳ Index

های گوناگون جانمایی شده‌اند. ابعاد و فواصل اسمی نمونه با توجه به عیوب محتمل در کاربردهای صنعتی انتخاب شده [۱۸] و در جدول (۱) آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- (راست) شماتیک نمونه طراحی شده با عیوب جانمایی شده؛ (چپ) نمونه ساخته شده به روش SLM بر روی میز ساخت^۱

البته این فضاهای خالی به دلیل ماهیت لایه لایه بودن فرایند ذوب انتخابی لیزری مملو از پودر هستند که در مورد شبیه‌سازی عیب عدم همجوشی و ترک‌های ناشی از آن پارامتری موثر می‌باشد. مطالعات پیشین بر روی اثر وجود پودر در حفره‌ها نشان دادند، با توجه به محبوس شدن پودر در عیوبی همچون عدم همجوشی، این محبوس شدن پودر باعث فراهم آمدن شبیه‌ساز بهتری برای عیب عدم همجوشی فراهم می‌کند [۱۸]. در اضلاع بیرونی نمونه، فضایی خالی از عیب برای کالیبراسیون سرعت موج طولی

^۱ Building platform

فرایند، اندازه‌گیری‌های دقیق انجام گردید تا مقاطع میانی ویژگی‌ها که در استوانه‌ها بیانگر قطر سطح مقطع آن‌ها می‌باشد؛ از دست نرود. اندازه‌گیری‌های تماسی به کمک میکروسکوپ نوری Olympus CX21 با بزرگنمایی ۵۰ برابر و دقت اندازه‌گیری ۱۰ میکرون انجام گردید.

۳- بحث و توضیح

چگالی نمونه از آزمون ارشمیدوس بدست آمد و از روی چگالی مرجع 8000 Kg/m^3 برای فولاد، میزان تخلخل نمونه ۰/۲۷ درصد بدست آمد که نشان از ساخت مطلوب نمونه و عدم حضور عیوب ساختاری متعدد در نمونه است. ابعاد خارجی نمونه به کمک میکرومتر و کولیس اندازه‌گیری شد و سپس سرعت‌های موج طولی مرجع برای نمونه در راستاهای اصلی و سرعت موج عرضی در راستای ۴۵ درجه در صفحه XZ بدست آمد. مقادیر مرجع بدست آمده در جدول (۱) آورده شده است. مشاهده می‌شود دقت ساخت ابعاد بیرونی ± 0.10 میلی‌متر بوده و سرعت امواج طولی در جهات مختلف متفاوت است. عدم تطابق ابعادی نمونه با مدل طراحی شده، اندکی به وجود تنش پسماند محبوس شده در قطعه بازمی‌گردد. چرا که استراتژی اسکن صفحه شطرنجی نسبت به استراتژی اسکن ۰ و ۹۰ درجه تنش پسماند بیشتری را در نمونه ایجاد می‌کند [۲۱]. با توجه به تفرانس ذکر شده در استاندارد ISO 2400 و EN 12223 برای بلوک استاندارد V1، که ± 0.10 میلی‌متر است، مشاهده می‌شود ابعاد خارجی در محدوده مطلوب قرار دارند. همچنین، حدود سرعت‌ها، ساختار آستنیتی^۱ نمونه تولید شده را تایید می‌کند [۲۲]. این اختلاف در سرعت‌های راستاهای مختلف به دلیل ناهمسانگردی ساختاری قطعات تولید افزایشی است که متاثر از ماهیت این نوع ساخت می‌باشد [۲۳]. این در حالیست که در استاندارد ISO 19675:2017 آمده است که سرعت موج در بلوک مرجع سنتی در جهات مختلف حداکثر ۰/۲٪ می‌تواند متفاوت باشد [۲۴]. این تفاوت برای دو راستای X و Y نمونه ساخته شده به دلیل بکارگیری استراتژی اسکن صفحه شطرنجی^۲

درجه طراحی و ساخته شده‌اند، تحقیق انجام گرفته توسط [۴] بود که نشان داد ویژگی‌های مایل بیشترین دقت ابعادی را در فرایند ساخت دارند. علاوه بر این، این ویژگی‌ها در نزدیکی سطح تعبیه شدند تا نماینده عیوب زیرسطحی باشند. به عبارت دیگر این ویژگی‌ها می‌توانند برای کالیبراسیون تجهیزات آزمون فراصوت لیزری و یا حتی جریان گردابی مورد استفاده قرار گیرند. لازم به ذکر است که در ساخت هیچ کدام از این ویژگی‌ها ساپورت بکار نرفته است و درون آن‌ها مملو از پودر ذوب نشده می‌باشد. این نمونه در حداقل ابعاد قابل آزمون با تجهیزات فراصوت پالس-اکو تماسی طراحی شده است؛ اما بدیهی است که این نمونه با توجه به نیاز می‌تواند در ابعاد بزرگ‌تری ساخته شود. هدف در این مقاله بررسی کیفیت ابعادی ساخت ویژگی‌ها و صحت فواصل مورد انتظار آن‌ها از سطوح آزاد است.

تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمون فراصوت، دستگاه فراصوت ساخت شرکت Karl Deutsch به همراه پراب‌های نرمال ۴ مگاهرتزی با قطر کریستال ۱۲ میلی‌متر و پراب‌های زاویه‌ای ۴ مگاهرتزی با اندازه کریستال 9×8 میلی‌متر با زوایای ۴۵ و ۷۰ درجه ساخت همین شرکت بود. قبل از شروع اندازه‌گیری‌ها، صحت و سلامت دستگاه و پراب‌ها به کمک بلوک‌های کالیبراسیون استاندارد موجود ارزیابی شد. در ابتدا، ابعاد بیرونی نمونه به دقت اندازه‌گیری شد و سرعت انتشار موج طولی در هر سه راستای اصلی قطعه و سرعت موج عرضی در راستای XZ تعیین گردید. نتایج بدست آمده، ناهمسانگردی ساختاری نمونه را تایید می‌کند. سپس با کالیبراسیون سرعت انجام شده، فواصل ویژگی‌ها از سطوح آزاد تعیین گردید. تمامی اندازه‌گیری‌ها در دمای محیط انجام گرفته است.

پس از انجام آزمون فراصوت A-scan و ارزیابی فواصل عیوب جانمایی شده از سطوح آزاد، آزمون مخرب روی قطعه انجام گردید تا با ابزارهای دقیق‌تری چون میکروسکوپ نوری و میکرومتر به بررسی دقت ابعادی ویژگی‌ها بپردازیم. برای انجام آزمون مخرب، به دلیل پیچیدگی داخلی قطعه و عدم اطمینان از ساخت صحیح فواصل، از روش ماشینکاری با نرخ براده‌برداری ۰/۰۲ میلی‌متر استفاده شد و طی انجام

¹ Austenitic microstructure

² Chess board

در ارزیابی عیوب مصنوعی، مقدار سرعت کالیبره کمتر از سرعت واقعی بوده و باعث شده اندازه‌گیری فاصله با خطا روبرو شود [۲۶]. از طرف دیگر، عیوبی که در فاصله حدود ۵ میلی‌متر یا کمتر از سطح آزاد نمونه قرار داشتند یا به این روش کشف نشدند و یا خطای اندازه‌گیری بالایی رخ داده است. دلیل این امر ماهیت روش فراصوت تماسی و ناحیه مرده پراب مورد استفاده است. با این حال، می‌توان برای نمونه‌های کاربردی دیگر فواصل ویژگی‌ها از سطوح آزاد را به گونه‌ای طراحی کرد تا امکان کشف با دقت بالا فراهم گردد. چنانکه در مورد اندازه‌گیری‌های دیگر این مسئله اثبات شده است. شکل (۳) تعدادی از سیگنال‌های دریافتی از برخی عیوب جانمایی شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، به دلیل میرایی بالای این نمونه که به دلیل ماهیت ساختاری و ریزساختار آن می‌باشد، سیگنال‌های متوالی برگشتی از عیوب و یا دیواره پشتی، مگر در مورد فواصل کم از سطح، به چشم نمی‌خورد [۹]. لذا در این مورد نیز تفاوتی با قطعات تولیدی به روش سنتی مشاهده می‌شود که با استانداردهای موجود نیز سازگار نمی‌باشد.

$$d = V_L \times t \quad (1)$$

شکل (۳-ا)، سیگنال دریافتی از انتهای استوانه به قطر ۱/۵ میلی‌متر را در فاصله ۱۰ میلی‌متری نشان می‌دهد. شکل (۳-ب) سیگنال دریافت شده از انتهای استوانه به قطر ۲ میلی‌متری را نشان می‌دهد که در مقایسه با سیگنال استوانه کرچک‌تر ارتفاع بیشتری دارد. این بدان معناست که می‌توان با جانمایی تعداد بیشتری استوانه و دریافت سیگنال از سطح بالایی و پایینی استوانه‌ها، حساسیت نسبت به اندازه عیب را در پراب‌های نرمال کالیبره کرد. شکل (۳-ج) سیگنال دریافتی از عیب جانمایی شده مکعبی در فاصله ۴ میلی‌متر از سطح را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سیگنال برگشت‌های متوالی از این عیب در این شکل قابل تشخیص است. مشاهده می‌شود، با توجه به فاصله کم این عیب تا سطح آزاد قطعه، سیگنال برگشتی به خوبی و با دقت مناسب قابل تشخیص بوده و این عیب مصنوعی می‌تواند نماینده عیوب زیرسطحی باشد. علاوه بر این، این عیب

در محدوده قابل قبول است اما در راستای Z که همان راستای ساخت می‌باشد، اختلاف زیاد است. همچنین با توجه به ماده مصرفی فولادی، مشاهده می‌شود سرعت‌های بدست آمده از آزمون با سرعت مرجعی که در استاندارد [۲۴] آمده است متفاوت است. بنابراین نیاز به یک استاندارد جامع به همراه بلوک‌های مرجع استاندارد برای کالیبراسیون تجهیزات آزمون‌های غیرمخرب قطعات تولیدی به روش افزایشی غیر قابل انکار است. البته انجام عملیات حرارتی و یا فرایند هیپ^۱ روی قطعه، این ناهمسانگردی را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد [۲۵]. بر روی قطعه مورد آزمون هیچگونه عملیات حرارتی انجام نشده و با توجه به این مقادیر، اندازه‌گیری‌های فراصوتی، اپتیکی و تماسی انجام شد.

جدول ۱- نتایج اندازه‌گیری‌های اولیه ابعاد بیرونی و سرعت‌های مرجع (دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی‌متر)

راستای اندازه‌گیری	طول اندازه‌گیری شده (mm)	سرعت اندازه‌گیری شده (m/s)
X	۴۵,۱۰	۵۵۴۹ ± ۱۰
Y	۳۵,۰۵	۵۵۶۰ ± ۱۰
Z	۲۵,۰۰	۵۶۷۰ ± ۱۰
X-Z	۲۵,۰۵	۲۷۵۰ ± ۱۰

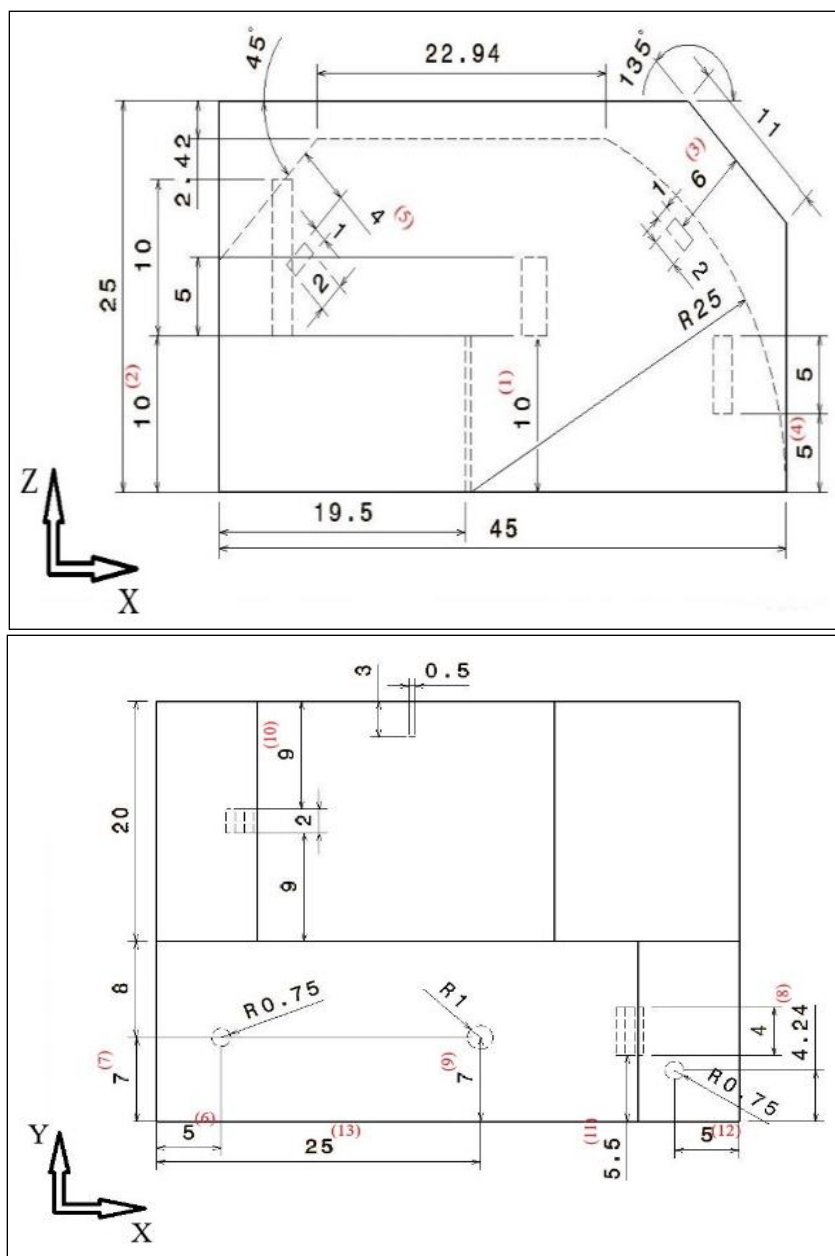
۱-۳- اندازه‌گیری‌های پراب نرمال

به کمک پراب نرمال، فواصل عیوب جانمایی شده از سطوح آزاد نمونه به کمک رابطه (۱) اندازه‌گیری شد؛ که در آن، d فاصله لبه برگشت دهنده موج تا سطح آزاد، V_L سرعت موج طولی در ماده و t زمان رفت موج از پراب تا برگشت دهنده است. نتایج این اندازه‌گیری‌ها برطبق شماره اندازه‌گیری‌ها که در داخل پرانتز در شکل (۲) آمده است، در جدول (۲) گزارش شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر از مقادیر اسمی می‌باشند. دلیل این امر این است که چون سرعتی که دستگاه با آن کالیبره شده، حاصل گذر موج از مسافت بیشتری نسبت به فاصله عیوب از سطح بوده و در نتیجه افت بیشتری را به دلیل وجود عیوب ناخواسته بیشتر در مسیر تجربه کرده است. لذا

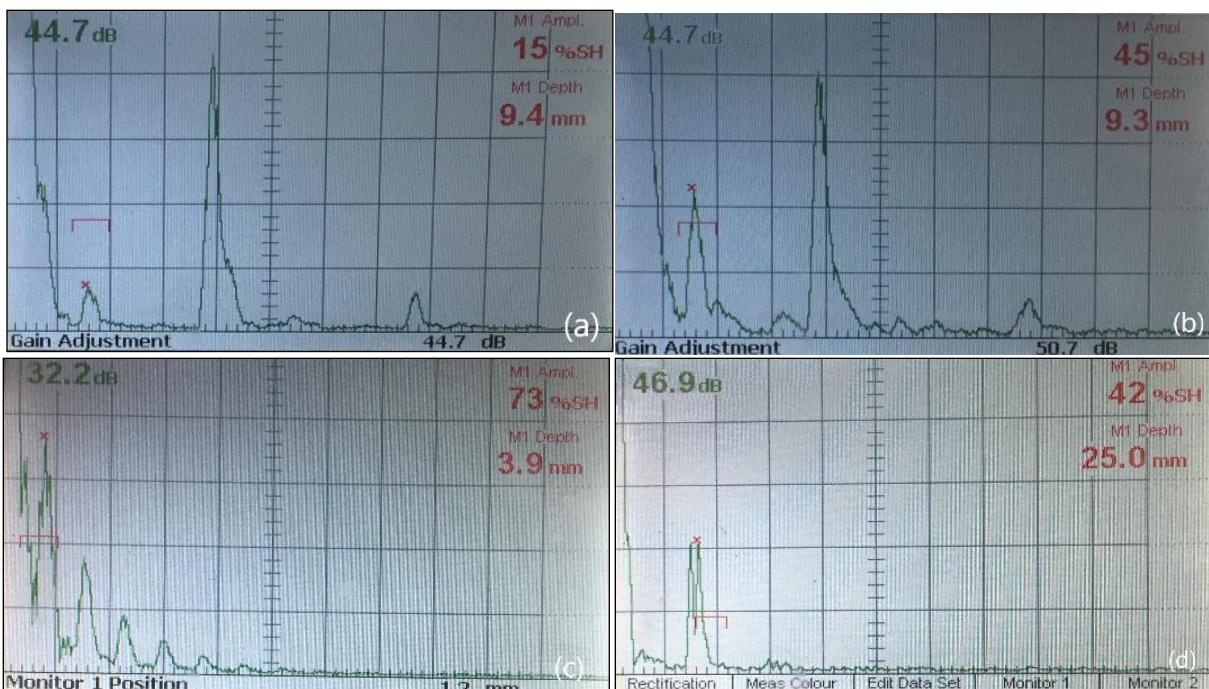
^۱ Hot isostatic pressing (HIP)

میزان کافی از هم جدا بوده و قابل تشخیص می‌باشند که نشان از کارایی این بخش از نمونه دارد. لذا می‌توان با ایجاد تعداد بیشتری از این دست پله‌ها با ارتفاع‌های مختلف برحسب نیاز، میزان قدرت تفکیک پراب و صفحه نمایش را محک زد.

برای کالیبراسیون تجهیزات فراصوت لیزری و غوطه‌وری نیز مناسب است. شکل (۳-d) سیگنال گرفته شده از پله ایجاد شده روی سطح بالایی نمونه را نشان می‌دهد. این پله برای حصول اطمینان از قابلیت تمییز دهی سیگنال دو عیب نزدیک به هم در صفحه نمایش دستگاه مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود، سیگنال‌ها به



شکل ۲- نقشه ابعادی نمونه طراحی شده به همراه شماره اندازه‌گیری‌ها



شکل ۳- تعدادی از سیگنال‌های دریافت شده از آزمون فراصوت A-scan

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری‌های فراصوتی در نمونه (تمامی مقادیر به میلی‌متر)، (دقت اندازه‌گیری ۰/۱ میلی‌متر)

شماره اندازه‌گیری	فاصله اسمی	فاصله اندازه‌گیری شده	درصد خطا (%)
۱	۱۰	۹,۲	۸
۲	۱۰	۹,۳	۷
۳	۶	۶	۰
۴	۵	۴	۲۵
۵	۴	۳,۹	۲,۵
۶	۵	۴,۳	۱۴
۷	۶,۲۵	۵,۹	۵,۶
۸	۳,۴۹	-	-
۹	۶	۵,۱	۱۵
۱۰	۹	۸	۱۱
۱۱	۵,۵	۴	۳۰
۱۲	۴,۲۵	۳,۹	۸
۱۳	۲۴	۲۳,۸	۰,۸

پراب را نشان می‌دهد. در قدم بعدی، استوانه‌های جانمایی شده در نمونه به کمک پراب‌های زاویه‌ای ارزیابی شد. با داشتن سرعت موج عرضی در نمونه حاضر و زاویه پراب عرضی در بلوک مرجع استاندارد V1، می‌توان زاویه شکست موج را در نمونه از قانون اسنل^۱ بین دو ماده مرجع و ماده

^۱ Snell's law

۳-۲- اندازه‌گیری‌های پراب زاویه‌ای

شاخص پراب‌های زاویه‌ای در ابتدا به کمک بلوک استاندارد V1 مشخص گردید و سپس با استفاده از نمونه ساخته شده ارزیابی شد. نتایج بدست آمده از آزمون بر روی نمونه در تایید نتایج بدست آمده از بلوک V1 بود. شکل (۴)، نحوه قراردگی پراب و سیگنال دریافتی در فرایند تعیین شاخص

۳-۳- اندازه‌گیری‌های تماسی

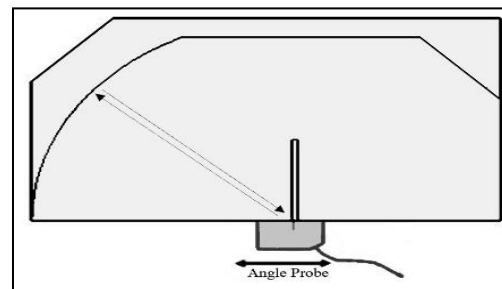
اندازه‌گیری تماسی و اپتیکی، مورد اطمینان‌ترین روش برای تعیین صحت ساخت ویژگی‌ها می‌باشد. چراکه اگر ویژگی به درستی ساخته شده باشد، می‌تواند به عنوان مرجع برای تجهیزات آزمون‌های غیرمخرب فراصوت، جریان گردابی و حتی رادیوگرافی مورد استفاده قرار گیرد. در اندازه‌گیری‌های تماسی، ابعاد ویژگی‌ها، هندسه و فواصل آن‌ها از وجوه بیرونی مورد توجه می‌باشد. در اکثر مطالعات پیشین، نوسندگان صرفاً از روش رادیوگرافی برای صحت‌سنجی ساخت استفاده کردند، اما روش رادیوگرافی به خودی خود می‌تواند آلوده به خطا باشد [۲۷]. لذا قابل اطمینان‌ترین روش برای صحت‌سنجی ساخت، اندازه‌گیری تماسی است که در این مقاله مورد بحث می‌باشد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تماسی به کمک میکروسکوپ نوری، کولیس و میکرومتر، در جدول (۳) آورده شده است. شماره حفره‌ها برطبق شماره‌بندی ذکر شده در شکل (۵) می‌باشد. تعدادی از تصاویر گرفته شده از عیوب جانمایی شده در زیر میکروسکوپ نوری در شکل (۶) آورده شده است. شکل (۶-۱) دیواره استوانه شماره یک را نشان می‌دهد که به درستی ساخته شده است. شکل (۶-۲)، سطح بالایی استوانه یک را نشان می‌دهد که به دلیل ریزش مذاب دندان‌دندان شده است. شکل (۶-۳) کف استوانه شماره یک را نشان می‌دهد که اشکال خاصی در ساخت نداشته است. شکل (۶-۴)، سطح بالایی استوانه شماره ۲ را نشان می‌دهد که به شکل نیم‌کروی ساخته شده و ریزش مذاب نداشته است. شکل (۶-۵)، کف استوانه شماره دو را نشان می‌دهد. شکل (۶-۶)، سطح بالایی استوانه شماره سه را نشان می‌دهد که در گوشه‌های آن کمان دایره‌ای ایجاد شده که کمی از ریزش مذاب جلوگیری کرده است. در شکل (۶-۷) کف استوانه شماره سه دیده می‌شود که مانند کف استوانه شماره یک می‌باشد. شکل (۶-۸) نیز عیب مصنوعی مکعبی را نشان می‌دهد که وجوه بالایی آن ریزش داشته است. در محدوده عیب مکعبی عیوب کوچکی در ابعاد ۶۰ میکرون به چشم می‌خورد که نیازمند بررسی‌های بیشتر می‌باشد.

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، ابعاد حفره‌ها با دقت بالایی از مدل CAD پیروی می‌کنند که این نشان از

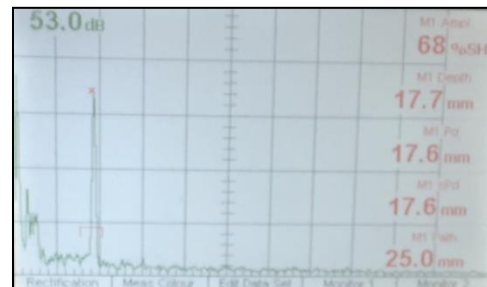
تولید افزایشی (رابطه (۲)) محاسبه کرد. در این رابطه، R نماد زاویه ورود موج به ماده تولید شده به روش افزایشی و R_R زاویه ورود موج به ماده مرجع می‌باشد. این ویژگی‌ها بخوبی امکان بازگشت امواج عرضی را فراهم کرده و با داشتن فواصل عمودی و افقی آن از پراب، امکان تعیین زاویه پراب و سرعت موج عرضی در آن راستا را فراهم می‌کند. با این حال برای کاربرد حداکثری این ویژگی‌های استوانه‌ای، باید ابعاد نمونه بزرگ‌تر باشد تا محدوده Leg II را نیز در پراب‌های زاویه‌ای پوشش دهند. علاوه بر این، این استوانه‌ها می‌توانند برای کالیبراسیون پراب‌های آرایه‌های فازی و غوطه‌وری نیز مورد استفاده قرار گیرند.

$$\frac{\sin R}{\sin R_R} = \frac{\text{Velocity in AMed part}}{\text{Velocity in V1 reference block}} \quad (2)$$

ناج قرار داده شده روی وجه نمونه، به عنوان یک بازتاب کننده قوی، قابلیت استفاده برای آزمون قطعات ترمیم شده به روش ساخت افزایشی، آزمون جوش‌ها و یا ترک‌های عمودی در قطعات مصرفی را دارا می‌باشد.



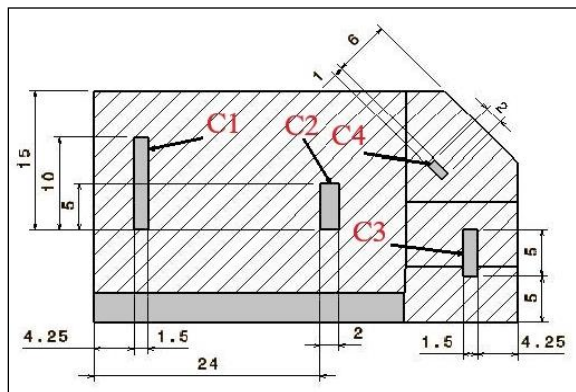
(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف) شماتیک آزمون مشخص نمودن شاخص پراب زاویه‌ای در نمونه ساخته شده (ب) سیگنال دریافتی در آزمون

مقادیر اندازه‌گیری شده به روش تماسی و اپتیکی، قابلیت بالای این روش در تولید نمونه‌های استاندارد را نشان می‌دهد.



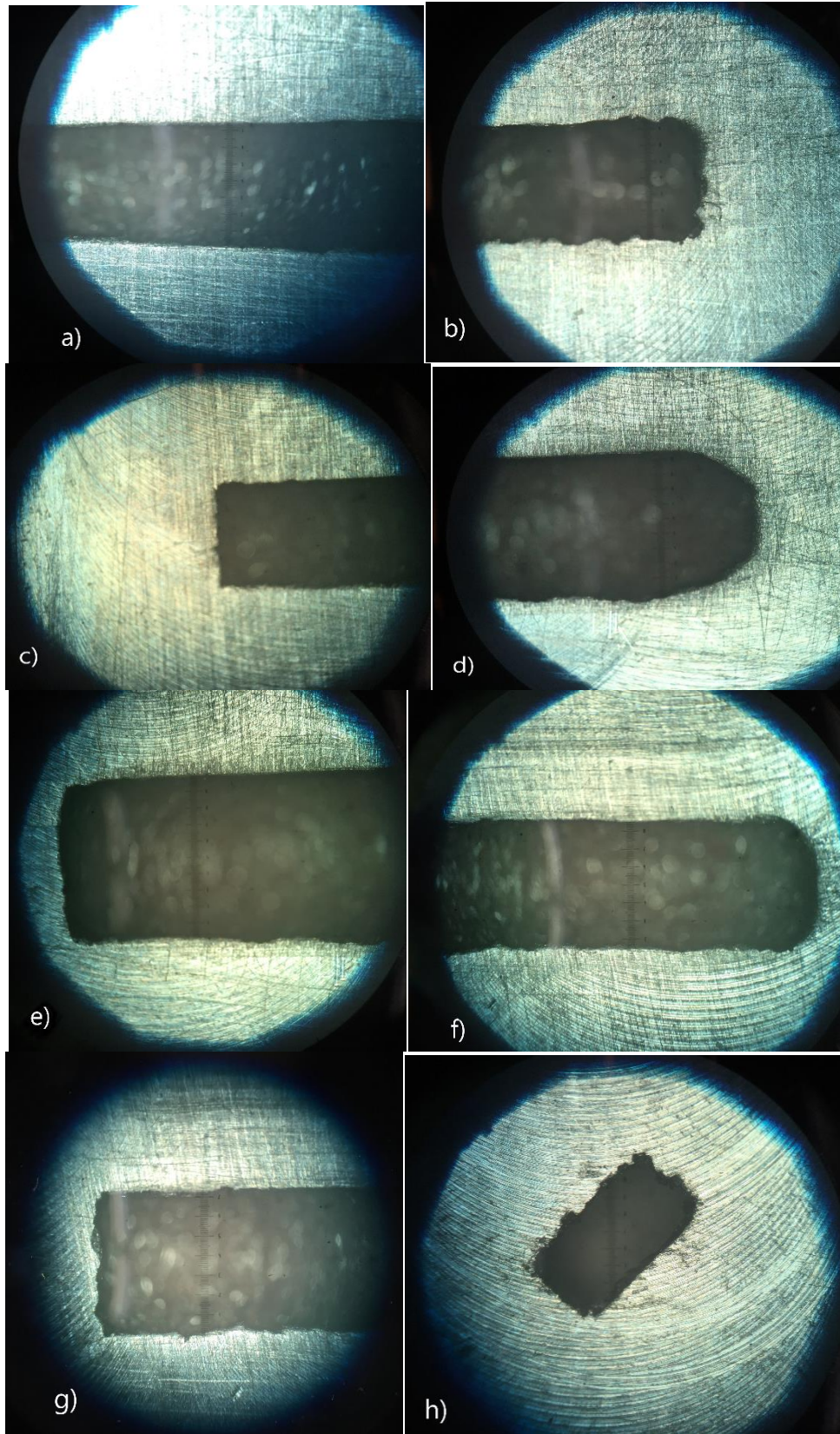
(الف)



(ب)

شکل ۵- (الف) شماتیک نمونه برش خورده؛ (ب) نمونه برش خورده

دقت بالای ساخت این ویژگی‌ها است. این در حالیست که بر طبق استاندارد ASME بخش ۵ [۲۸]، در رابطه با بلوک‌های مرجع، برای قطر سوراخ‌ها تolerانس $0/8$ میلی‌متر و برای موقعیت آن‌ها تolerانس ۳ میلی‌متر بیان گردیده است. با این حال، دقت ساخت ویژگی‌های استوانه‌ای بیشتر از ویژگی‌های مکعبی بوده است. دلیل این امر، وجوه بالایی مکعب‌ها است که به دلیل نفوذ مذاب به فضای خالی ابعاد اندازه‌گیری شده اندکی از ابعاد اسمی کمتر شده‌اند. البته با توجه به ضخامت هر لایه که ۳۰ میکرون بود، این میزان ریزش قابل پیش‌بینی بود. این مسئله در رابطه با سطح بالایی استوانه‌ها هم پیش آمد. هرچند در مورد استوانه با قطر ۲ میلی‌متر در نمونه حاضر، برای جلوگیری از ریزش مذاب، قسمت بالایی آن به شکل نیم‌کره طراحی شد. همچنین در رابطه با فاصله این ویژگی‌ها از سطوح آزاد، بیشینه خطا $0/2$ میلی‌متر بود که با توجه به ماهیت این نوع روش ساخت و استانداردهای ابعادی ساخت بلوک‌های کالیبراسیون آزمون فراصوت، در محدوده قابل قبول قرار دارند. ضمناً صافی سطح نمونه ساخته شده در سطوح مختلف بین ۲ تا ۱۵ میکرومتر است که با در نظر گرفتن میزان صافی سطح در استانداردهای گوناگون که همگی در حدود $1/6$ میکرومتر هستند، بوسیله پولیشکاری قابل رفع است. با این حال، با وجود عدم قطعیت ۵۰ میکرون برای قطعات ساخته شده به روش ذوب انتخابی لیزری [۴]،



شکل ۶- تصویر عیوب جانمایی شده زیر میکروسکوپ نوری

جدول ۳- اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط میکروسکوپ نوری، میکرومتر و کولیس (دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی‌متر)

مرجع اندازه‌گیری	ابعاد اسمی (mm)	ابعاد اندازه‌گیری شده قبل از پولیشکاری (mm)	بیشینه خطا (%)
C1	۱۰ × ۱,۵	۹,۹۶ × ۱,۴۸	۱,۳
C2	۵ × ۲	۵,۰۰ × ۱,۹۸	۱
C3	۵ × ۱,۵	۴,۸۰ × ۱,۴۸	۱,۳
C4	۲ × ۱	۱,۹۶ × ۱,۰۴	۴
دیواره حفره ۱ از دیواره قطعه	۴,۲۵	۴,۳۰	۱,۱
سقف حفره ۱ از لبه بالایی قطعه	۵	۵,۱۰	۲
کف حفره ۱ از کف قطعه	۱۰	۱۰,۰۵	۰,۵
ارتفاع استوانه ۱	۱۰	۹,۸۶	۱,۴
دیواره حفره ۲ از دیواره قطعه	۲۴	۲۴,۲۰	۰,۸
سقف حفره ۲ از لبه بالایی قطعه	۱۰	۱۰,۱۰	۱
کف حفره ۲ از کف قطعه	۱۰	۹,۹۵	۰,۵
ارتفاع استوانه ۲	۵	۴,۹۰	۲
دیواره حفره ۳ از دیواره قطعه	۴,۲۵	۴,۳۰	۱,۱
کف حفره ۳ از کف قطعه	۵	۵,۰۲	۰,۴
ارتفاع استوانه ۳	۵	۴,۸۳	۳,۴
حفره ۴ تا سطح	۵	۶,۱۰	۱,۶

۴- نتیجه‌گیری

یک نمونه بلوک مرجع حاوی دو نوع عیب جانمایی شده استوانه‌ای و مکعبی در ابعاد گوناگون از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶L به روش ذوب انتخابی لیزری طراحی و ساخته شد. صحت و دقت ساخت این عیوب مصنوعی و فواصل آن‌ها از سطوح آزاد به روش آزمون فراصوت تماسی و روش‌های اندازه‌گیری تماسی و اپتیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون فراصوت نشان دادند، عیوب جانمایی شده قابلیت کشف از عمق ۴ میلی‌متر به بالا را دارا بوده و همچنین حساسیت مناسبی نسبت به تغییر ابعاد ویژگی‌ها

دارد. با این حال لازم است که این ویژگی‌ها برحسب نیاز در فاصله بهینه از سطوح آزاد قرار داده شوند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تماسی نشان داد، دقت ساخت ابعاد بیرونی $\pm 10\%$ میلی‌متر و همچنین تolerانس فواصل ویژگی‌ها از سطوح آزاد، $\pm 20\%$ میلی‌متر بوده که همگی در استانداردهای موجود می‌گنجند. بنابراین، با اعمال پولیشکاری و عملیات حرارتی مناسب به جهت کم کردن ماهیت ناهمسانگردی قطعه، می‌توان از آن برای مقاصد کالیبراسیون تجهیزات آزمون غیرمخرب استفاده کرد.

by Additive Manufacturing, Using Laser Generated Ultrasound”, in: *Materials Science & Technology*, 2016.

[12] Everton, S., Dickens, P., Tuck, C., Dutton, B., “Using Laser Ultrasound to Detect Subsurface Defects in Metal Laser Powder Bed Fusion Components”, *JOM* (2018), March 2018, Volume 70, Issue 3, pp 378–383. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2661-7>

[13] S. K. Everton, P. Dickens, C. Tuck, B. Dutton, “Evaluation of laser ultrasonic testing for inspection of metal additive manufacturing” in: *Proceeding of SPIE Vol. 9353*, 2015. doi: 10.1117/12.2078768

[14] A. Jansson, A. R. Zekavat, L. Pejryd, “Measurement of Internal Features in Additive Manufactured Components by the use of Computed Tomography”, in: *International symposium of digital industrial radiology and computed tomography* (2015).

[15] V. Dayal, Z. G. Benedict, N. Bhatnagar, A. G. Harper, “Development of Composite Calibration Standard for Quantitative NDE by Ultrasound and Thermography”, in: *44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Volume 37, AIP Conf. Proc. 1949, 060006-1–060006-7; <https://doi.org/10.1063/1.5031552>

[16] L. W. Koester, H. Taheri, T. A. Bigelow, P. C. Collins, L. J. Bond, “Nondestructive Testing for Metal Parts Fabricated Using Powder-Based Additive Manufacturing”, *Materials Evaluation*, Vol. 76, Issue 4 (2018), pp. 514 – 524. Available at: http://works.bepress.com/timothy_bigelow/23/

[17] ASTM E1158-04, Standard Guide for Material Selection and Fabrication of Reference Blocks for the Pulsed Longitudinal Wave Ultrasonic Examination of Metal and Metal Alloy Production Material, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, www.astm.org doi:10.1520/E1158-04

[18] A. Tawfik, P. Bills, L. Blunt, R. Racasan, “Development of an artefact to detect unfused powder in additive manufactured components using X-ray CT”, in: *8th Conference on Industrial Computed Tomography*, Wels, Austria (iCT 2018).

[19] ASME Section VIII-Division 1: Example Problem Manual, <https://www.asme.org/products/codes-standards/ptb4-2013-section-viii-division-1-example-problem>

[20] Fazarinc, M., Muhič, T., Kugler, G., and Terčelj, M., 2012. “Thermal fatigue properties of differently constructed functionally graded materials aimed for refurbishing of pressure-die-casting dies”. *Engineering Failure Analysis*, 25, pp. 238 – 249.

[21] H. Ali, H. Ghadbeigi, K. Mumtaz, “Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V”, *Materials Science & Engineering A*, Volume 712, 17 January 2018, Pages 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.103>

[22] V. M. Ushakov, D. M. Davydov, “Calibration Blocks for Ultrasonic Nondestructive Testing”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, March 2006, Volume 42, Issue 3, pp 149–155. <https://doi.org/10.1134/S1061830906030016>

[23] A. Alafaghani, A. Qattawi, M. A. G. Castañón, “Effect of manufacturing parameters on the

۵-منابع

[1] D. Cerniglia, M. Scafidi, A. Pantano, J. Rudlin, “Inspection of additive-manufactured layered components”, *Ultrasonics* 62 (2015), pp. 292–298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2015.06.001>

[2] D. Mahmoud, M. A. Elbestawi, “Selective laser melting of porosity graded lattice structures for bone implants”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, February 2019, Volume 100, Issue 9–12, pp 2915–2927. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2886-9>

[3] L. Koester, R. A. Roberts, D. J. Barnard, S. Chakrapani, S. Singh, R. Hogan, L. J. Bond, “NDE of Additively Manufactured Components with Embedded Defects (Reference Standards) Using Conventional and Advanced Ultrasonic Methods”, in: *43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Volume 36, (2017).

[4] F. H. Kim, H. Villarraga-Gómez, S. P. Moylan, “Inspection of embedded internal features in additively manufactured metal parts using metrological x-ray computed tomography”, in: *ASPE/euspen*, (2016), pp. 191 – 195.

[5] W. Du, Q. Bai, Y. Wang, B. Zhang, “Eddy current detection of subsurface defects for additive/subtractive hybrid manufacturing” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, April 2018, Volume 95, Issue 9–12, pp. 3185–3195. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1354-2>

[6] G. Davis, R. Nagarajah, S. Palanisamy, R. A. R. Rashid, P. Rajagopal, K. Balasubramaniam, “Laser ultrasonic inspection of additive manufactured components”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, pp. 1 – 9. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3046-y>

[7] N. P. Aleshin, M. V. Grigor’ev, N. A. Shchipakov, N. V. Krys’ko, I. S. Krasnov, M. A. Prilutskii, Ya. G. Smorodinskii, “On the Possibility of Using Ultrasonic Surface and Head Waves in Nondestructive Quality Checks of Additive Manufactured Products”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, Vol. 53, No. 12, pp. 830 – 838.

[8] A. Lopez, R. Bacelar, I. Piresa, T. G. Santos, José Pedro Sousa, Luisa Quintino, “Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing”, *Additive Manufacturing* Volume 21, May 2018, Pages 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.020>

[9] N. P. Aleshin, V. V. Murashov, N. A. Shchipakov, I. S. Krasnov, D. S. Lozhkova, “Experimental Research into Possibilities and Peculiarities of Ultrasonic Testing of Additive Manufactured Parts”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, Vol. 52, No. 12, pp. 685 – 690.

[10] P. H. Yang, X. X. Gao, J. Liang, Y. W. Shi, N. Xu, “Nondestructive Testing of Defects in Additive Manufacturing Titanium Alloy Components”, in: *15th Asia Pacific Conference for Nondestructive Testing (APCNDT2017)*, 2017, Singapore.

[11] S. K. Everton, P. Dickens, C. Tuck, B. Dutton, “Identification of Sub-Surface Defects in Parts Produced

- [26] D. R. Foster, M. J. Dapino, S. S. Babu, "Elastic constants of Ultrasonic Additive Manufactured Al 3003-H18", *Ultrasonics* 53, (2013), pp. 211 – 218. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.06.002>
- [27] J. Hiller, P. Hornberger, "Measurement accuracy in X-ray computed tomography metrology: Toward a systematic analysis of interference effects in tomographic imaging", *Precision Engineering* 45, (2016), pp. 18–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.003>
- [28] ASME Boiler & Pressure Vessel Code on Nondestructive Testing – Section V, Article 4, The American Society of Mechanical Engineers, July 2015.

- microstructure and mechanical properties of metal laser sintering parts of precipitate hardenable metals", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, December 2018, Volume 99, Issue 9–12, pp 2491–2507. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2586-5>
- [24] ISO 19675:2017, Non-destructive testing — Ultrasonic testing — Specification for a calibration block for phased array testing (PAUT), International Organization for Standardization, 2017.
- [25] C. Qiu, N. J. E. Adkins, M. M. Attallah, "Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti–6Al–4V", *Materials Science & Engineering A* 578 (2013), pp. 230–239. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.04.099>