Journal of Nondestructive Testing Technology
Online ISSN: 2676-6655
Doi: 10.30494/JNDT.2024.445103.1140

Investigating Nondestrucive Tests Used in the Inspection of Parts Produced by Additive Manufacturing (AM) Method

Mohammad Riahi [1] | **Asma Soleymani** [2]

1. Corresponding Author, Department of mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: riahi@iust.ac.ir
2. Department of mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: a_soleymani98@mecheng.iust.ac.ir

Article Information:
Research Article
Received 21 Feb. 2024
Revised 03 March 2024
Accepted 18 March 2024
Keywords:
Non-destructive testing,
Additive manufacturing,
Porosity,
Inspection.

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) is based on the deposition of materials with high precision to make a final part or component using different methods. This process is considered one of the main developments in the fourth industrial revolution and is still growing. There are many different types of additive manufacturing methods, and today, the use of efficient inspection methods is required to ensure a certain level of quality and detect defects and discontinuities in the industry. Today, in industry, non-destructive testing (NDT) is widely used, especially in additive manufacturing, to ensure efficient quality control and predictive maintenance without changing the properties and initial state of materials. Each non-destructive testing method is based on different physical principles and the correct selection and use of each test depends on the application, manufacturing process, type of material possible discontinuities, and many other things. The most common defects created in AM parts in terms of appearance include porosity, entrapped impurity, cracks, and material defects, which are mainly caused by changes in manufacturing parameters, injection parameters, and initial material properties. In this article, the performance of non-destructive tests was investigated to inspect the parts produced by the additive manufacturing method. These tests include visual inspection, liquid penetrant testing, magnetic particle testing, eddy current testing, ultrasonic testing, XCT, acoustic emission testing, and thermography testing. The application of each of the mentioned NDT methods in additive manufacturing and their suitability for detecting the defects of parts manufactured by the AM method were investigated. Also, the sensitivity, advantages, and disadvantages of each method were evaluated and the types of defects and the ability to detect these defects by NDT methods were mentioned. Considering that there are 7 categories of production methods in additive manufacturing, in this research, the application of each NDT test for different categories of AM process was discussed and the challenges in each were mentioned.

Cite this article: Riahi, M. & Soleymani, A. (2023). Investigating Non-destructive Tests Used in the Inspection of Parts Produced by Additive Manufacturing (AM) Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 108-123. http//doi.org/10.30494/JNDT.2024.445103.1140

Doi: 10.30494/JNDT.2024.445103.1140

مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب
شاپای الکترونیکی: ۶۶۵۵-۲۶۷۶

بررسی آزمون‌های غیر مخرب مورد استفاده در عیب‌یابی قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی (AM)

محمد ریاحی [۱] ✉ | اسماء سلیمانی [۲]

۱. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، مرکز پیشرو آزمون‌های مکانیکی و غیر مخرب، riahi@iust.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، مرکز پیشرو آزمون‌های مکانیکی و غیر مخرب، a_soleymani98@mecheng.iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:
مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۱۲/۰۲
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۲/۱۲/۱۳
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱۲/۱۸
کلیدواژگان:
آزمون‌های غیر مخرب،
ساخت افزایشی،
تخلخل،
بازرسی.

چکیده:

ساخت افزایشی (AM) ساختن یک قطعه یا جزء نهایی بر اساس رسوب مواد با دقت بالا با استفاده از روش‌های مختلف است. این فرآیند یکی از پیشرفت‌های اصلی در انقلاب صنعتی چهارم به شمار می‌رود و همچنان در حال رشد می‌باشد. انواع مختلفی از روش‌های ساخت افزایشی وجود دارد و امروزه استفاده از روش‌های بازرسی کارآمد برای اطمینان از سطح معینی از کیفیت و تشخیص عیوب و ناپیوستگی‌ها در صنعت مورد نیاز است. امروزه در صنعت، آزمون‌های غیر مخرب (NDT) به طور گسترده و به‌ویژه در ساخت افزایشی، برای اطمینان از کنترل کیفیت کارآمد و نگهداری پیش بینانه بدون تغییر ویژگی‌ها و حلت اولیه مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر روش آزمون غیر مخرب بر اساس اصول فیزیکی مختلفی انجام می‌شود و انتخاب و استفاده صحیح از هر آزمون به کاربرد، فرآیند ساخت، نوع ماده و ناپیوستگی‌های احتمالی و بسیاری از موارد دیگر بستگی دارد. متداول‌ترین عیوب ایجاد شده در قطعات AM از نظر ظاهری شامل تخلخل، ناخالصی حبس شده، ترک و نقص در مواد است که عمدتاً ناشی از تغییر در پارامترهای تولید، پارامترهای تزریق و ویژگی‌های اولیه مواد است. در این مقاله به بررسی عملکرد آزمون‌های غیر مخرب به منظور بازرسی قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی پرداخته شد. این آزمون‌ها شامل بازرسی چشمی، آزمون مایع نافذ، آزمون ذرات مغناطیسی، آزمون جریان گردابی، آزمون فراصوت، روبش سی تی با پرتو ایکس (XCT)، آزمون نشرآوایی و آزمون دمانگاری است. کاربرد هر کدام از روش‌های NDT ذکر شده در ساخت افزایشی و مناسب بودن آن‌ها برای تشخیص عیوب قطعات ساخته‌شده به روش AM مورد بررسی قرار گرفت. همچنین میزان حساسیت و مزایا و معایب هر روش ارزیابی شد و انواع نقص، و قابلیت تشخیص این عیوب توسط روش‌های NDT ذکر گردید. با توجه به اینکه ۷ دسته روش تولید در ساخت افزایشی وجود دارد، در این تحقیق کاربرد هر آزمون NDT برای دسته‌های مختلف فرآیند AM مورد بحث قرار گرفت و چالش‌های موجود در هر کدام ذکر گردید.

استناد: ریاحی، محمد؛ سلیمانی، اسماء. (۱۴۰۲). بررسی آزمون‌های غیر مخرب مورد استفاده در عیب قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی (AM). *مجله فناوری آزمون‌های غیر مخرب*، ۳ (۳)، ۱۲۳-۱۰۸. http//doi.org/10.30494/JNDT.2024.445103.1140

۱- مقدمه

تولید افزایشی[1] (AM) یک فناوری نوظهور است که در آن قطعات سه‌بعدی با افزودن مواد اولیه به صورت لایه به لایه در یک سطح مقطع دوبعدی تولید می‌شود. تولید افزایشی در سال‌های اخیر به سرعت توسعه یافته است و انتظار می‌رود این روند در سال‌های آینده نیز ادامه یابد [۱].

صنایع مختلف عمدتاً از AM برای تولید قطعات کاربردی و نمونه‌های اولیه استفاده می‌کنند تا در نهایت از آن‌ها در فرایندهای نصب و مونتاژ استفاده کنند. استفاده از فناوری‌های AM به‌ویژه برای ساخت محصولات پیچیده‌ای که در حجم کم تولید می‌شوند، مناسب می‌باشد. برخی از این کاربردها شامل صنایع پزشکی، خودروسازی، هوافضا، الکترونیک و ... است [۲].

در روش تولید افزایشی ابتدا قطعه به کمک کامپیوتر طراحی شده و سپس فایل طراحی شده به فرمت‌های مخصوص تبدیل می‌شود. در حال حاضر فرمت STL محبوب‌ترین و پرکاربردترین فرمت برای دستگاه چاپ سه‌بعدی می‌باشد. در مرحله بعد مدل به یک روش مشخص چاپ شده و شکل نهایی آن کامل می‌گردد. پس از چاپ مدل قطعه باید از دستگاه جدا شده و عملیات پس پردازش از جمله پولیش، سمباده زنی، جوشکاری سرد و ... روی آن انجام گردد [۲].

روش‌های مختلفی برای فرآیند ساخت افزایشی وجود دارد که با یکدیگر متفاوت می‌باشد. با توجه به تحقیقات انجام شده، روش‌های تولید افزایشی موجود را می‌توان بر اساس فناوری مورد استفاده برای فرآیند تولید به هفت دسته اصلی طبقه‌بندی کرد. این دسته‌بندی‌ها در جدول ۱ همراه با نام تجاری و عملکرد اصلی آن‌ها ارائه شده است [۳].

امروزه استفاده از روش AM در نمونه‌سازی سریع پروتزهای پزشکی و طراحی ایمپلنت‌ها به شدت گسترش یافته است. روش تولید افزایشی همچنین در بازسازی بسیاری از ساختارهای آناتومیکی از جمله فک پایین و ترمیم دندان کاربرد دارد و اثربخشیِ این تکنیک در جراحی صورت و در موارد دیگر مانند لگن، کشاله‌ی ران و بازسازی مفصل زانو و لگن ثابت شده است. در این تکنیک از بیوسرامیک‌ها، فلزات سازگار با بافت‌های زنده و پلیمرها به جای استخوان و بافت استفاده می‌شود. با توجه به کاربرد این روش در صنایع حساس و احتمال وجود عیب هنگام تولید این قطعات، در صورت استفاده از قطعات معیوب ممکن است حوادث ناگواری رخ دهد. در نتیجه بازرسی و تشخیص عیوب در قطعات تولید شده از اهمیت زیادی برخوردار بوده و امروزه چالش بسیاری از محققین در این زمینه می‌باشد [۴].

آزمون‌های غیر مخرب[2] (NDT) معمولاً برای بازرسی و اطمینان از کیفیت محصول استفاده می‌شوند. مزیت اصلی روش‌های NDT، قابلیت بررسی خرابی یا ناپیوستگی احتمالی موجود در نمونه‌ها بدون از بین بردن یکپارچگی محصول، بافت سطح و کاربرد آتی قطعه مورد بررسی است. روش‌های NDT به قطعه مورد بازرسی آسیب وارد نمی‌کند، بنابراین یک مزیت بزرگ در بررسی محصول نهایی قبل از تحویل آن به مشتری به شمار می‌رود [۵].

امروزه، آزمایش‌های غیر مخرب مدرن در تمام مراحل تولید AM برای ارائه قابلیت اطمینان و یکپارچگی محصول، کنترل فرآیند تولید، به حداقل رساندن هزینه‌های تولید و حفظ استانداردهای کیفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور اخیرا برخی استانداردها در زمینه نحوه انجام آزمون‌های غیرمخرب در روش AM تدوین شده است که آخرین نسخه آن با نام ISO/ASTM TR 52905:2023 در دسترس می‌باشد. بنابراین هدف این مقاله بررسی روش‌های NDT قابل اجرا در فناوری AM به منظور شناسایی عیوب مختلف در این قطعات از جمله ترک، تخلخل و جدایش لایه‌ها است.

[1] Additive manufacturing

[2] Non-destructive testing

جدول ۱) طبقه‌بندی فرآیندهای AM

تکنولوژی AM	نام روش	توضیح
اکستروژن مواد	FDM	مواد از طریق یک نازل گرم شده اکسترود می‌شوند.
پلیمریزاسیون مخزنی	SLA, DLP and CLIP	پخت انتخابی فوتوپلیمر مایع با استفاده از پلیمریزاسیون فعال شده با نور.
گداخت بستر پودر	SLS, SLM, DMLS, EBM, SHS and LBM	همجوشی حرارتی انتخابی پودر با استفاده از لیزر یا پرتو الکترونی
پاشش مواد	MJ and DOD	رسوب قطرات مواد توسط هد چاپ جوهر افشان
پاشش چسب	3DP, BJ and PBIH	رسوب قطرات مایع به بستر پودری با استفاده از هد چاپ جوهر افشان
رسوب مستقیم با انرژی	LMD, EBF, LENS, DLD and DMD	سیم یا پودر از یک نازل اکسترود یا دمیده می‌شود و توسط پرتو الکترونی یا لیزر ذوب می‌شود.
لایه نشانی ورقه ای	LOM, UAM	چندین ورق بریده شده از طریق چسب، لحیم کاری، جوشکاری یا تثبیت اولتراسونیک به یکدیگر متصل می شوند.

۲- طبقه‌بندی انواع عیوب در AM

برخی از عیوب و ناپیوستگی‌های ریزساختاری نهایی به وجود آمده در قطعات تولید شده به روش AM عمدتاً ناشی از تغییرات در پارامترهای تولید از جمله قدرت لیزر، مورفولوژی پودر، سرعت توسعه لایه، پارامترهای تزریق و ویژگی‌های اولیه مواد است. شاخص‌ترین عیوب به وجود آمده در این قطعات از نظر ظاهری شامل تخلخل[1]، ناخالصی حبس شده[2]، ترک و نقص در مواد اولیه است [۶].

۲-۱ تخلخل

تخلخل یکی از معمول‌ترین عیوب است که در فرآیندهای تف جوشی و ذوب AM یافت می‌شود. تخلخل با کمبود مواد یا حفره‌های باقیمانده در یک منطقه خاص به دلیل ذوب ناکافی یا گازهای به دام افتاده نشان داده می‌شود. این نوع عیوب یک فرم نامنظم را نشان می‌دهد که معمولاً بین لایه‌ها یافت می‌شود[۷].

۲-۲ ناخالصی حبس شده

اندازه، نحوه توزیع و شکل ناخالصی‌های حبس شده بر خواص اجزاء نهایی تأثیر زیادی دارد. ناخالصی‌های حبس شده می‌توانند عمدی ایجاد شوند یا در فرآیند ساخت به وجود آمده و نامطلوب باشند. هدف از گنجاندن عمدی ناخالصی‌ها، بهبود برخی خواص مکانیکی ماتریس است که معمولاً پراکندگی‌هایی با اندازه کوچک در حدود ۲۰۰ میکرومتر برای جلوگیری از غلظت تنش ریزساختاری ایجاد می‌شود. در موارد نامطلوب، ناخالصی‌های موجود در مواد اولیه یا ناپیوستگی در ماده اصلی، همراه با فرآیندهای ساخت، ممکن است منجر به تشکیل ذرات یا بقایای بین فلزی شود که اندازه‌ای بین ۰/۵ میکرومتر تا ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهند. این محدوده در تعریف رفتار مکانیکی محصولات AM به خصوص در شکل‌پذیری و استحکام خستگی آن‌ها بسیار حساس می‌باشد. با توجه به ماهیت داخلی این نوع نقص، استفاده از روش‌های نوین NDT برای شناسایی و تعیین کمیت همه انواع ناخالصی‌های حبس شده در قطعات AM ضروری می‌باشد [۷].

۲-۳ ترک

ترک در محصولات AM به عنوان ناپیوستگی در برخی اجزای آن به دلیل تنش‌های پسماند در محدوده مقاومت تسلیم در نظر گرفته می‌شوند. ترک‌ها می‌توانند داخلی یا خارجی باشند و اندازه و شکل آن به عوامل مختلفی بستگی دارد. مشکلات ذوب، پارامترهای فیزیکی و متغیرهای فرآیند ساخت ممکن است باعث افزایش بروز ترک در اجزای AM شود. تغییر در توزیع انرژی حرارتی حاصل از اتصال مواد

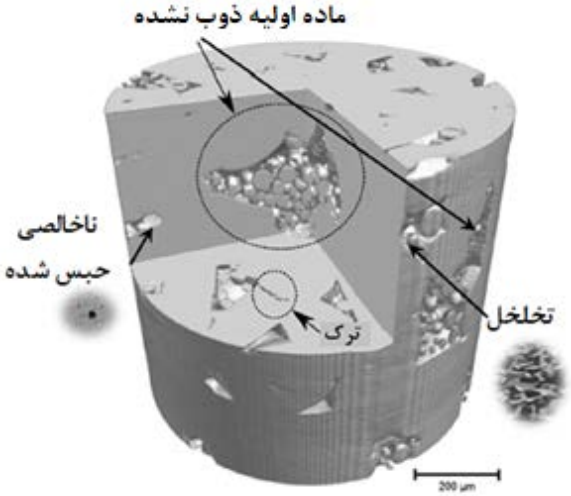
[1] Porosity

[2] Inclusions

اولیه در لایه های مختلف باعث ایجاد مناطق خالی می‌شود. ناهنجاری‌های هندسی، ناخالصی‌های حبس شده یا ذرات ذوب نشده نیز می‌توانند باعث ایجاد تمرکز تنش شده و سپس موجب ایجاد ترک در نمونه هنگام ساخت شوند [۷].

۲-٤ نقص در مواد اولیه و یا ماده اولیه ذوب نشده

ویژگی‌های ماده اولیه نیز تأثیر زیادی در ویژگی‌های نهایی قطعه دارد. مسائل مربوط به نحوه تولید ماده اولیه از جمله فیلامنت یا پودر و ناخالصی‌های موجود در آن باعث کاهش کیفیت فرآیند AM شده و همچنین باعث ایجاد حفره و تخلخل می‌شود. به عنوان مثال در فرآیند گداخت بستر پودر، ذرات پودر کوچک‌تر با تراکم زیاد، نرخ عیب را کاهش می‌دهند، اگرچه ممکن است مشکلات ایمنی در طول پردازش ایجاد شود. اگر ماده اولیه به خوبی ذوب نشود، در طول عملیات ساخت به درستی پردازش نشده و پیچیدگی تشخیص عیب با روش‌های قدیمی را افزایش می‌دهد [۷]. شکل ۱ برخی از عیوب ایجاد شده در یک قطعه تولید شده به روش AM را نشان می‌دهد.



شکل ۱) انواع عیوب ایجاد شده در قطعات AM [۸]

۳- روش‌های NDT مورد استفاده در AM

برخی از روش‌های NDT را می‌توان به عنوان روش‌های بازرسی پس از فرآیند تولید مطابق با استانداردهای موجود بر روی قطعات ساخته‌شده با روش ساخت افزایشی استفاده کرد. این تکنیک‌ها شامل بازرسی چشمی[1]، آزمون مایع نافذ[2]، آزمون ذرات مغناطیسی[3]، آزمون فراصوتی[4]، آزمون جریان گردابی[5]، روبش سی تی با پرتو ایکس (XCT)[6]، آزمون نشرآوایی[7] و آزمون دمانگاری[8] است. برخی از این تکنیک‌ها از جمله بازرسی چشمی ، آزمون فراصوتی ، آزمون دمانگاری و نشرآوایی همچنین می‌توانند به عنوان روش‌های بازرسی درجا هنگام تولید قطعات نیز مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه کاربرد هر کدام از این روش‌ها در بازرسی قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی و مزایا و معایب هر کدام ذکر می‌گردد.

٤- بازرسی چشمی

بازرسی چشمی گسترده‌ترین تکنیک مورد استفاده در بین تمام آزمون‌های غیر مخرب است. این روش سرعت بالایی دارد، ساده بوده و برای اکثر نمونه‌ها کاربرد دارد و معمولاً هزینه کمی دارد. بازرسی چشمی اغلب به عنوان یک تکنیک برای اطمینان از صحت ساخت قطعه قبل از به‌کارگیری سایر تکنیک‌های NDT مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصل اساسی حاکم بر NDT چشمی مبتنی بر روشنایی نمونه با نور است که معمولاً در ناحیه نور مرئی طیف الکترومغناطیسی است. سطح نمونه آزمایشی باید قبل از انجام بازرسی تمیز شود. بازرسی چشمی می‌تواند ناپیوستگی‌هایی از جمله ترک، سوراخ، خوردگی و آسیب‌های ناشی از ضربه را تشخیص دهد. این روش همچنین می‌تواند منابع احتمالی شکست مکانیکی مانند بریدگی‌های تیز و وجود یا عدم وجود لایه اکسیدی روی سطح نمونه را شناسایی کند. به طور کلی، عیوبی که باعث شکست سطح یا ایجاد تغییر شکل در سطح می‌شوند، با این روش قابل تشخیص هستند. حداقل اندازه عیوبی که چشم انسان می‌تواند تشخیص دهد تقریباً ۰/۲۵ اینچ است. مدت کار مجاز برای یک بازرس انسانی به طور مداوم باید به دو ساعت محدود شود زیرا ممکن است خطاها به دلیل تبعیض چشمی و قابلیت اطمینان ضعیف ایجاد شود. این تکنیک NDT برای تشخیص ناپیوستگی‌های سطحی قطعات ساخته شده با

[1] Visual inspection
[2] Liquid penetrant testing
[3] Magnetic particle testing
[4] Ultrasonic testing
[5] Eddy current testing
[6] Xray- computed tomography
[7] Acoustic emission testing
[8] Thermography

روش ساخت افزایشی مناسب است. این روش می‌تواند در طول فرآیند چاپ و به عنوان یک تکنیک بازرسی پس از فرآیند برای بررسی کیفیت قطعات مورد استفاده قرار گیرد. در این روش هیچ محدودیتی در نوع مواد و اندازه قطعه برای بازرسی وجود ندارد. اما تشخیص عیوب زیرسطحی با بازرسی چشمی امکان پذیر نیست، اما می‌تواند به عنوان یک تکنیک بازرسی برای ارزیابی میزان تشکیل ناپیوستگی‌ها قبل از انجام تحقیقات بیشتر با استفاده از تکنیک‌های NDT که قادر به تشخیص عیوب زیرسطحی هستند، استفاده شود. مزایا و معایب این روش در جدول ۲ آورده شده است [۹].

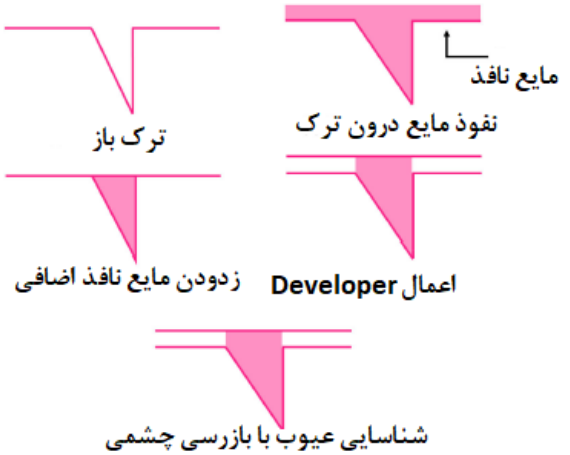
جدول ۲) مزایا و معایب بازرسی چشمی قطعات AM

مزایا	معایب
قابل اعمال برای قطعات با اندازه مختلف	محدود به عیوب روی سطح
هزینه کم	نیاز به آموزش بازرسان برای درک چشمی درست از عیوب
سرعت بالا	
بدون نیاز به تجهیزات گران قیمت	

قابلیت شناسایی خرابی قطعات در مرحله اولیه ساخت، امکان جلوگیری از خرابی زودرس قطعه را در حین کار نشان می‌دهد. جانسون و همکاران در سال ۲۰۱۶ تصاویر لایه‌های گرفته شده توسط دوربین نوری در حین چاپ با تصاویر مرجع برش داده را مقایسه می‌کنند. کیفیت بخش چاپ شده با شناسایی وجود هر گونه انحراف بین تصویر گرفته شده و تصویر مرجع، کمی سازی کردند. در این تحقیق پس از بازرسی یک لایه مشخص، فرآیند چاپ قبل از درخواست بازرسی دیگر ادامه یافت و بازخورد بلادرنگ در مورد کیفیت قطعه چاپ شده به اپراتور ارائه شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که انتخاب مناسب دوربین، لنز و نور برای بازرسی چشمی تصاویر گرفته شده ضروری می‌باشد [۱۰].

۵- آزمون مایع نافذ (PT)

آزمون مایع نافذ برای بازرسی عیوب موجود در سطح قطعات ساخته شده از مواد غیر متخلخل استفاده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. در این روش از تجمع یک سیال در اطراف یک ناپیوستگی برای ایجاد نشانه از یک نقص سطحی استفاده می‌کند. اثرات مویرگی ناشی از کشش سطحی ناشی از نیروی منسجم بین مولکول‌های مایع، و خواص مرطوب‌کنندگی مواد باعث می‌شود که مایع به ناپیوستگی‌های روی سطح نفوذ کند. مایع نافذ معمولاً قرمز روشن یا فلورسنت است تا بازرسی چشمی عیوب را آسان کند. این روش بازرسی نافذ روی سرامیک، پلاستیک، لاستیک قالب‌گیری شده و شیشه قابل اجرا است. همچنین برای فلزاتی مانند تیتانیوم، مس، آلومینیوم و فولاد ضدزنگ نیز مناسب است [۱۱].



شکل ۲) مراحل انجام آزمون مایع نافذ [۱۱]

حساسیت این روش را می‌توان به عنوان توانایی مایع نافذ برای آشکار کردن عیوب در یک ماده تعریف کرد. به طور کلی، ترک‌هایی با عرض تقریبی ۵ میکرومتر را می‌توان با استفاده از ماده نافذ رنگ قابل مشاهده تشخیص داد، در حالی که ترک‌هایی با عرض بین ۱ تا ۲ میکرومتر را می‌توان با استفاده از نافذ فلورسنت تشخیص داد.

یکی از ویژگی‌های قابل توجه در قطعات تولید شده با روش AM، وجود مقدار بیشتری از تخلخل در مقایسه با قطعات معمولی فرفورژه یا قالب‌گیری است. استفاده از آزمایش مایع نافذ بر روی قطعات فلزی ساخته‌شده به روش AM برای تشخیص ناپیوستگی‌ها، به هیچ تکنیک اضافی مانند ماشین‌کاری و پرداخت نیاز ندارد که این به دلیل پرداخت سطحی ذاتی اکثر قطعات فلزی ساخته شده با روش AM است.

آزمون مایع نافذ یک تکنیک تشخیص عیب سطحی است. از این رو عیوب تعبیه شده موجود در زیر سطح قطعه چاپی ساخته شده با روش AM مانند تخلخل‌ها غیرقابل

شناسایی هستند. عیوب حجمی و لایه‌لایه شدن زیر سطح، که عیوب رایج موجود در فرآیندهای همجوشی بستر پودری هستند، در قطعات تولید شده با ذوب پرتو الکترونی و SLM با این روش شناسایی نمی‌شوند. مزایا و معایب این روش در جدول ۳ آورده شده است [۱۲].

جدول ۳) مزایا و معایب آزمون مایع نافذ قطعات AM

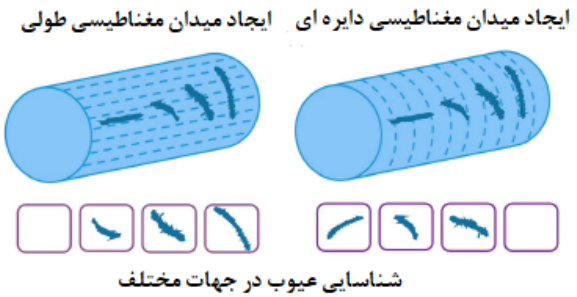
مزایا	معایب
بازرسی کل سطح قطعه در زمان کم	غیر قابل انجام برای قطعات دارای تخلخل زیاد
هزینه کم	نیاز به تمیزکاری سطح
سرعت بالا	عدم شناسایی عیوب زیرسطحی
تجهیزات ساده و ارزان	

۶- آزمون ذرات مغناطیسی (MT)

آزمایش ذرات مغناطیسی برای بازرسی مواد فرومغناطیسی که بیشتر آلیاژهای آهن، نیکل و کبالت را در بر می‌گیرند، استفاده می‌شود. هنگامی که یک نمونه مغناطیسی می‌شود، خطوط نیروی مغناطیسی که به عنوان شار مغناطیسی نیز شناخته می‌شود، عمدتاً در داخل ماده فرومغناطیسی قرار دارند. وجود یک نقص در نمونه، جریان شار مغناطیسی را مختل می‌کند و در نتیجه نشتی شار مغناطیسی موضعی ایجاد می‌کند. این نقص اساساً باعث یک تغییر موضعی ناگهانی در نفوذپذیری می‌شود، که به راحتی می‌توان یک شار مغناطیسی را در یک مدار مغناطیسی ایجاد کرد. بازرسی عیوب در آزمایش ذرات مغناطیسی به تشخیص این نشتی شار میدان مغناطیسی محلی بستگی دارد.

هنگامی که ذرات مغناطیسی ریز بر روی سطح نمونه مغناطیسی شده پاشیده می‌شوند، در محل‌های نقص تجمع می‌یابند و الگویی چشمی برای تخمین شکل و اندازه نقص ایجاد می‌کنند. در مورد نقص زیرسطحی، نشانه‌ای با وضوح کمتر مشاهده می‌شود زیرا میزان نشت شار برای ناپیوستگی‌هایی که به سطح راه ندارند کمتر است.

ترک‌ها، ناپیوستگی‌های محبوس شده، حفره‌ها، درزها و ترک‌ها انواع نقص‌هایی هستند که معمولاً با آزمایش ذرات مغناطیسی شناسایی می‌شوند. برای ایجاد حداکثر دقت در این روش، شار مغناطیسی باید عمود بر جهت عیب باشد. از این رو، شار مغناطیسی باید در بیش از یک جهت القا شود زیرا نقص می‌تواند در هر زاویه‌ای نسبت به محور اصلی قطعه وجود داشته باشد. برای تشخیص عیب میدان مغناطیسی در دو جهت طولی و دایره‌ای در قطعه‌ایجاد می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۳) تأثیر جهت شار مغناطیسی بر شناسایی نقص [۱۳]

اشکال عمده آزمایش ذرات مغناطیسی، کاربرد آن فقط برای مواد فرومغناطیسی است، که باعث تحقیقات پراکنده این روش بر روی قطعات ساخته شده با روش AM شده است. مواد رایج مورد استفاده در AM در جدول ۴ طبقه‌بندی شده‌اند [۱۴]. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، فقط آلیاژهای مبتنی بر نیکل و کبالت مواد فرومغناطیسی هستند که وسعت کاربرد این روش آزمایش را محدود می‌کند. مناسب بودن آزمون ذرات مغناطیسی برای آلیاژهای مبتنی بر مواد فرومغناطیس با در نظر گرفتن عوامل مختلف پیچیده‌تر می‌شود. به عنوان مثال، میزان مغناطیس اینکونل ۷۱۸ به مقدار دقیق نیکل و آهن، دمای کار و حد حساسیت مغناطیسی مجاز برای یک کاربرد معین بستگی دارد. مزایا و معایب این روش در جدول ۵ ذکر شده است [۱۵].

جدول ۴) مواد مورد استفاده در AM [۱۴]

نوع مواد	مواد مورد استفاده در AM
پلیمر	پلی لاکتیک اسید (PLA)، آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی آمید (PA)، پلی اورتان ترموپلاستیک (TPU)، پلاستیک مات سخت (Vero)
سرامیک	آلومینا (Al2O3)، کاربید سیلیکون (SiC)، نیترید سیلیکون (Si3N4)، زیرکونیا (ZrO2)، آلومینوسیلیکات لیتیوم (LAS)
فلز	فولاد ضدزنگ، آلیاژهای مبتنی بر نیکل (inconel 625/718)، آلیاژهای مبتنی بر تیتانیوم (Ti-6Al-4V)، آلیاژهای آلومینیوم (AlSi10Mg)، کبالت کروم

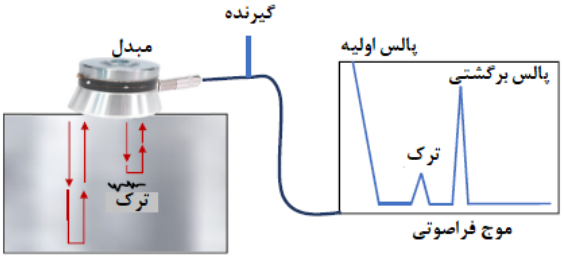
جدول ۵) مزایا و معایب آزمون ذرات مغناطیسی در قطعات AM

مزایا	معایب
نتایج قابل تفسیر	مناسب برای مواد فرومغناطیس
قابلیت شناسایی عیب پر شده با مواد خارجی	فقط برای عیوب سطحی و زیرسطحی
کم هزینه	نیاز به مغناطیس زدایی قطعه
تجهیزات ساده و ارزان	

۷- آزمون فراصوتی (UT)

آزمون فراصوتی یکی از کاربردی‌ترین تکنیک‌های NDT برای همه مواد است و بر اساس دستیابی به امواج فراصوتی با فرکانس‌های بالا در حدود ۱ تا ۲۰ مگاهرتز توسط مبدلی است که روی قطعه قرار می‌گیرد. امواج فراصوتی ناشی از نوسانات ذرات ماده هستند و در یک محیط منتشر می‌شوند. این امواج در میان مواد حرکت می‌کنند و کسری از انرژی منعکس شده باعث شناسایی ناپیوستگی‌ها می‌شود. اساس کار آزمون فراصوتی در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۶].

عیب‌های اصلی شناسایی‌شده توسط آزمون فراصوتی شامل تخلخل، خوردگی، ترک‌ها یا ناخالصی‌های محبوس شده هستند. سطح حساسیت اندازه‌گیری فراصوتی به اندازه کافی بالا است تا تغییرات کوچک در تخلخل در حدود ۰/۴ درصد را نیز تشخیص می‌دهد. UT تحت تأثیر پیچیدگی شکل هندسی قرار نمی‌گیرد و نتایج قابل اعتمادی را در اجزای نازک یا بزرگ ارائه می‌دهد.



شکل ۴) اصول آزمون فراصوتی [۱۶]

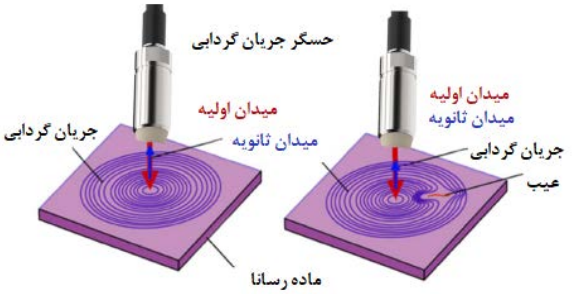
آزمون فراصوتی یک تکنیک کارآمد برای تشخیص ناپیوستگی‌ها و اندازه‌گیری خواص مکانیکی در مواد تولید شده با روش AM هستند. این پتانسیل برای نظارت و آزمایش عیوب در این قطعات وجود دارد زیرا هر لایه در طول فرآیندهای همجوشی بستر پودری ساخته می‌شود. با توجه به تحقیقات انجام شده، در آزمون فراصوتی زبری سطح مانع از تشخیص عیوب نزدیک سطح می‌شود. قطعات ساخته شده به روش AM دارای زبری سطح اسمی در حدود ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر برای فرآیندهای بستر پودری و کمتر از ۸۰ میکرومتر برای فرآیندهای تغذیه پودر هستند. از این رو، می‌توان پیش‌بینی کرد که قطعات چاپ شده با استفاده از فرآیندهای تغذیه پودر، مانند LENS، در آزمون فراصوتی با مقدار زیادی نویز و کاهش قابل توجهی در دامنه سیگنال نقص مواجه خواهند شد. به طور کلی، آزمون فراصوتی برای قطعات ساخته شده از فرآیندهای بستر پودری مناسب‌تر است زیرا زبری سطح پایین‌تری دارند. مزایا و معایب آزمون فراصوتی در جدول ۶ ذکر شده است [۱۷].

جدول ۶) مزایا و معایب آزمون فراصوتی در قطعات AM

مزایا	معایب
مناسب برای عیوب سطحی و حجمی	نیاز به اپراتور ماهر
بدون خطرات زیست‌محیطی	تجهیزات گران قیمت
دقت و سرعت بالا	نیاز به ماده واسط
تجهیزات ساده و ارزان	

۸- آزمون جریان گردابی (ET)

آزمون جریان گردابی یک NDT برای توصیف ناپیوستگی‌ها بر اساس اصل الکترومغناطیس بدون هیچ‌گونه عملیات سطحی است. در این آزمون نوسانات جریان الکتریکی القا شده به ماده طبق قانون القای الکترومغناطیسی فارادی تحلیل می‌شود. این تکنیک یک جریان متناوب را اعمال می‌کند که از طریق یک سیم‌پیچ اولیه جریان می‌یابد تا یک میدان مغناطیسی ثانویه ایجاد کند. هنگامی که سیم‌پیچ اولیه و مواد به اندازه کافی نزدیک باشند، جریان گردابی در قطعه القا می‌شود. اصول کار آزمون جریان گردابی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵) اصول آزمون جریان گردابی [۱۸]

ظهور عیب باعث تغییرات در جریان گردابی و ایجاد میدان مغناطیسی مخالف می‌شود. این تفاوت در میدان مغناطیسی تحت تأثیر هندسه قطعه، رسانایی مواد و شرایط مغناطیسی است که توسط گیرنده برای تحلیل بیشتر نظارت و ثبت می‌شود. این روش برای پایش بلادرنگ قطعه مورد استفاده قرار می‌گیرد و یکی از کاربردی‌ترین تکنیک‌ها برای نظارت بر دمای بالا و مواد با عملیات حرارتی است. با این حال، ET فقط برای مواد رسانا، به عنوان مثال، فلزاتی مانند آلومینیوم، فولاد و روی قابل استفاده است.

فرکانس جریان متناوب برانگیخته پارامتر اصلی در آزمون جریان گردابی است. عمق تحریک توسط جریان با فرکانس‌های بالاتر کاهش می‌یابد. مقدار عمق نفوذ δ، به صورت معادله ۱ تعریف می‌شود [۱۹]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} = \frac{1}{\sqrt{f\sigma\pi\mu_0\mu_r}} \qquad (۱)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای، σ رسانایی ماده، μ نفوذپذیری، μ_0 نفوذپذیری مطلق و μ_r نفوذپذیری نسبی است.

محدودیت اصلی این تکنیک وابستگی زیاد آن به تغییرات رسانایی، جریان مغناطیسی و انواع بی‌نظمی‌ها در مواد است. این حساسیت بالا پیچیدگی تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و تشخیص خطا را افزایش می‌دهد، زیرا الگوریتم‌های پیشرفته و آموزش‌های قوی لازم برای جلوگیری از نویز سیگنال مورد نیاز است.

اجرای ET در فرآیندهای AM به دلیل اثرات ناپیوستگی و محدودیت‌های این تکنیک یک کار چالش برانگیز است. فرآیندهای AM دارای تغییرات در نفوذپذیری مغناطیسی و نوسانات زبری در محدوده ۱/۸ تا ۲۵ میکرومتر ناشی از رسوب لایه‌ها است. ET در فرآیندهای AM با زبری بالا بدون تأثیر انتقال حرارت قابل استفاده است زیرا ممکن است انتقال حرارت بر خواص مواد تأثیر بگذارد. نمونه‌های رسانای دارای عیوبی مانند ترک و آخال که باعث تغییر در امپدانس خروجی می‌شود، با آزمایش جریان گردابی قابل تشخیص هستند. همچنین خوردگی سطحی و زیرسطحی را می‌توان با این روش تشخیص داد. این تکنیک نیازی به حذف پوشش‌های سطحی مانند رنگ برای بازرسی ندارد.

حساسیت تشخیص ناپیوستگی به مواد، نوع عیب و جهت آن، عمق عیب و کیفیت سطح ماده بستگی دارد. آزمایش جریان گردابی را می‌توان برای بازرسی قطعات رسانا با ضخامت تا ۶ میلی‌متر با حساسیت کافی استفاده کرد. تکنیک‌های AM قادر به چاپ طیف وسیعی از مواد است که شامل مواد فلزی و غیرفلزی می‌شود. از آنجایی که استفاده ذاتی از آزمایش جریان گردابی بر روی مواد رسانای الکتریکی است، قطعات ساخته شده از مواد زیستی، پلیمری و مواد سرامیکی برای این روش NDT مناسب نیستند.

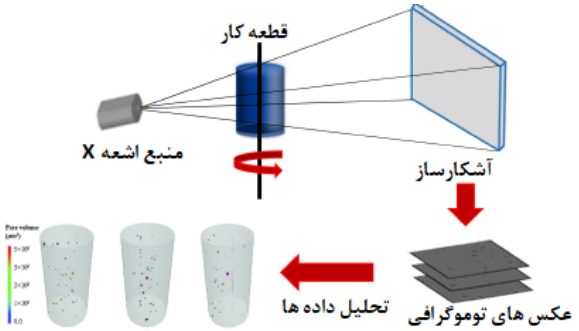
سازه‌های فلزی چند لایه معمولاً با آزمایش جریان گردابی برای تشخیص ترک و خوردگی بازرسی می‌شوند. آزمایش جریان گردابی قادر است سطوح مختلف عمق مواد را بر اساس فرکانس سیم‌پیچ القایی بررسی کند. میزان موفقیت در تشخیص عیوب بحرانی تا حد زیادی به پایان سطح و ساختار دانه‌بندی قطعه‌ای که تحت آزمایش جریان گردابی قرار می‌گیرد، بستگی دارد. مزایا و معایب آزمون جریان گردابی در جدول ۷ ذکر شده است [۲۰].

جدول ۷) مزایا و معایب آزمون جریان گردابی در قطعات AM

مزایا	معایب
روش غیر تماسی	فقط برای مواد رسانا
دقت و سرعت بالا	تجهیزات گران قیمت
عدم نیاز به آماده‌سازی سطح	نیاز به اپراتور ماهر
مناسب برای دمای بالا	تشخیص عیوب عمود بر سطح بازرسی

۹- آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس (XCT)

این تکنیک به دلیل مشخصات فنی و مبنای رایج آن یک آزمایش تصویربرداری در نظر گرفته می‌شود. در این تکنیک با یک سیستم اشعه X بر قطعه اعمال می‌شود تا ناپیوستگی‌های داخلی را با اعمال چرخش ۳۶۰ درجه حول یک محور تشخیص دهد. اساس کار آزمون سی تی با پرتو ایکس در شکل ۶ نشان داده شده است [۲۱].



شکل ۶) أساس کار آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس [۲۱]

قابلیت اطمینان این روش به چندین متغیر بستگی دارد. کیفیت تصاویر با توجه به ظرفیت نفوذ اشعه X تعیین می‌شود که حداقل ۱۰ درصد از انتقال در آن لازم است. ظرفیت نفوذ وابسته به انرژی اشعه X بوده و هنگام وجود ناپیوستگی‌های موضعی، چگالی اشعه X هنگام ورود به قطعه به دلیل چگالی جذب متفاوت مواد و اثرات پراکندگی کاهش می‌یابد. اثرات پراکندگی اشعه X ناشی از تغییرات در مسیر بین منبع انرژی و قطعه موردنظر می‌تواند منجر به تغییرات در نتایج بازرسی شود.

این محدودیت‌ها به وضوح با مواد متراکم و اجسام بزرگ نشان داده می‌شوند که در آن حساسیت تشخیص عیب توسط آزمون سی تی کاهش می‌یابد. با وجود این محدودیت‌ها، آزمون سی تی با پرتو ایکس یک تکنیک مناسب و قابل اعتماد با اجرای آسان است. این تکنیک NDT امکان بازرسی ۱۰۰ درصد کل قطعه و تعیین پارامترهای داخلی و سطحی را فراهم می‌کند.

استفاده از این تکنیک در AM از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا می‌تواند ناپیوستگی‌های رایج در مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی مانند تخلخل، جهت‌گیری و شکل لایه‌ها و اتصال بین لایه‌ها را تشخیص دهد. در این روش، تکنیک‌های جدید پردازش تصویر، تشخیص الگو و الگوریتم‌های شناسایی قطعه برای به دست آوردن مجموعه داده‌های کمی از تصویر مورد نیاز است [۲۲].

عیوب قابل تشخیص توسط آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس شامل حفره‌ها و ناخالصی‌های محبوس شده است. میزان پرتویی که از طریق ماده نفوذ می‌کند، یک عامل مهم برای در نظر گرفتن حساسیت رادیوگرافی است. مقدار نوردهی انتخاب شده باید به میزانی اشعه ایکس تولید کند که به سادگی برای نفوذ به مواد کافی باشد، یعنی با حداقل نوردهی به مواد نفوذ کند. اکثر استانداردها، مانند استانداردهای انجمن آمریکایی (ASTM) بسته به ضخامت ماده، تنظیماتی را برای ولتاژ اشعه ایکس و منابع رادیو ایزوتوپ توصیه کرده‌اند. حساسیت آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس به توانایی آن در نمایش کوچک‌ترین ناپیوستگی ممکن در عکس‌برداری اشاره دارد. در مقیاس عددی، مقدار حساسیت کوچک‌تر نشان‌دهنده قابلیت تشخیص بهتر است. این مقدار می‌تواند بر حسب مقدار مطلق باشد یا به صورت درصد نسبت به ضخامت نمونه بیان شود.

با توجه به تحقیقات انجام شده، شناسایی و تأیید صلاحیت اجزای ساخته شده به روش AM، تشخیص عیوب داخلی، بررسی ویژگی‌های غیرقابل دسترس، و تأیید اثربخشی عملیات انجام شده پس از تولید قطعه، توسط آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس قابل دستیابی است.

آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس در کنترل کیفیت فرآیندهای AM به کار گرفته شده است. برای اینکه فناوری‌های AM اطمینان قابل توجهی از بازار به دست آورند، قطعات تولید شده باید دقیق باشند. از این رو باید بتوان پارامترهای حیاتی در طول چاپ را کنترل کرد به طوری که تولید قطعه قابل پیش‌بینی باشد. یکی از دلایل اساسی ظهور AM توانایی آن در ساخت ساختارهای پیچیده

در یک چاپ واحد در مقایسه با روش‌های معمولی است که موفقیت محدودی دارند. سازه‌هایی با هندسه‌های پیچیده اغلب دارای فضاهای توخالی یا برش هستند. آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس یک تکنیک NDT مناسب برای تشخیص عیب قطعات با اشکال پیچیده بدون نیاز به جداسازی قطعات است.

با این حال، اندازه نمونه قابل بازرسی با اندازه نگه‌دارنده نمونه ابزار که در بین ماشین‌ها متفاوت است، محدود می‌شود. همچنین تضعیف ناشی از برهمکنش بین پرتو ایکس و نمونه، که توسط اثر فوتوالکتریک و پراکندگی کامپتون محاسبه می‌شود، موضوع دیگری است که باید در نظر گرفته شود.

از این رو، مواد با اعداد اتمی بالا، مانند استخوان یا فلزات، به طور قابل توجهی تضعیف را در انرژی‌های پایین‌تر اشعه ایکس افزایش می‌دهند که منجر به اثرات سخت شدن پرتو می‌گردد. روبش سی تی با پرتو ایکس ممکن است قادر به تشخیص دقیق عیوب در نمونه‌هایی با اعداد اتمی بالا، مانند فولاد ضدزنگ نباشد. علاوه بر این، انتخاب ترکیب مناسب از پارامترها در حین اسکن مواد، که شامل ولتاژ نیز می‌شود، نیاز به آموزش گسترده برای آموزش اپراتورهای ماهر دارد.

روبش سی تی با پرتو ایکس برای تمام نمونه‌های تولید شده با روش‌های مختلف AM با هر سطح، شکل و ماده‌ای با چگالی و ضخامت مشخصی که با اشعه ایکس قابل نفوذ باشد، قابل استفاده است. این روش تنها تکنیک NDT است که امکان دستیابی به یک مدل کامل با سطح داخلی و خارجی نمونه را فراهم می‌کند. روبش سی تی با پرتو ایکس تحت تأثیر ویژگی‌های مواد مانند سطوح تاریک، بازتابنده یا شفاف و مناطق سایه‌دار قرار نمی‌گیرد. مزایا و معایب روبش سی تی با پرتو ایکس در جدول ۸ ذکر شده است [۲۳].

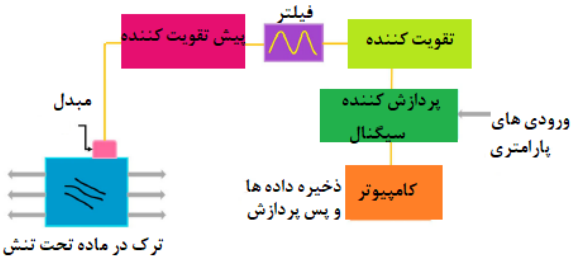
جدول ۸) مزایا و معایب آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس در قطعات AM

مزایا	معایب
شناسایی عیوب سطحی و داخلی قطعه	نیاز به ولتاژ بالا برای تولید اشعه x
دقت و سرعت بالا	تجهیزات گران قیمت
عدم نیاز به آماده‌سازی سطح	نیاز به اپراتور ماهر
مناسب برای دمای بالا	محدودیت در اندازه قطعه

۱۰- آزمون نشرآوایی (AE)

آزمون نشرآوایی در میان تکنیک‌های مختلف NDT، بر اساس ساده‌ترین مفاهیم اساسی است. انتشار آکوستیک پدیده‌ای است که در آن آزاد شدن سریع انرژی از منابع موضعی، امواج الاستیک گذرا ایجاد می‌کند. برخی از نمونه‌های این پدیده شامل شکست، شروع و رشد ترک و تغییر شکل پلاستیک است. یکی از جنبه‌های برجسته آزمون نشرآوایی در مقایسه با سایر تکنیک‌ها، این است که سیگنال‌ها در خود ماده تولید می‌شوند. بازرسی و تحلیل بر اساس سیگنال‌های صوتی ایجاد شده توسط انتشار ناپیوستگی‌ها در ماده تحت یک محرک مانند دما و تنش انجام می‌شود. اطلاعات مربوط به محل ناپیوستگی و یکپارچگی ساختاری مواد را در این شرایط می‌توان به دست آورد [۲۴].

یکی از ویژگی‌های مهم آزمون نشرآوایی برگشت‌ناپذیری آن است. هنگامی که یک ماده تحت یک سطح تنش معین قرار گرفته و بارگذاری می‌شود، تا زمانی که میزان تنش از سطح تنش قبلی فراتر نرود، هیچ انتشاری پس از بارگذاری مجدد وجود نخواهد داشت. این امر به دلیل ارتباط نزدیک انتشار صوتی با تغییر شکل و شکست پلاستیک است. ویژگی برگشت‌ناپذیری امکان تشخیص رشد زیربحرانی عیوب از جمله رشد ترک خستگی و ترک خوردگی تنشی را فراهم می‌کند. شکل ۷ یک مجموعه آزمایشی استاندارد را برای آزمایش نشرآوایی نشان می‌دهد [۲۵].



شکل ۷) اصول آزمون نشرآوایی[۲۵]

وجود شکاف در مواد باعث ایجاد تنش‌های کوچک یا امواج مافوق صوت در هنگام قرار گرفتن در معرض تنش می‌شود. انتشارات صوتی تولید شده توسط مبدل شناسایی می‌شود که پالس‌های موج را به ضربه‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. پیش تقویت‌کننده سیگنال‌ها را تقویت می‌کند و فیلتر برای افزایش نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود. سپس ضربه‌های الکتریکی قبل از پردازش، تحلیل و ارزیابی داده‌ها توسط تقویت‌کننده تقویت شده و نتایج بر روی کامپیوتر نمایش داده می‌شود.

آزمون نشرآوایی در مقایسه با سایر تکنیک‌های NDT بسیار حساس است. برای آزمایش جریان گردابی، اولتراسونیک و روبش سی تی با پرتو ایکس، با فرض اینکه شرایط ایده آل برآورده شود، حداقل اندازه ترک قابل تشخیص تقریباً ۰/۵ میلی‌متر است. در حالی که آزمایش نشرآوایی قادر به تشخیص رشد ترک در حد ۲۵ میکرومتر است.

رشد یک یا چند نقص را می‌توان با آزمایش انتشار آکوستیک تشخیص داد. هنگامی که رشد نقص به اندازه بحرانی نزدیک می‌شود، نرخ تعداد انتشار صوتی ثبت شده به شدت افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بی‌ثباتی و خرابی قریب‌الوقوع قطعه است.

این تکنیک پتانسیل نظارت بر فرآیند چاپ برای قطعات تولید شده به روش AM را دارد. تغییرات در ریزساختار، عیوب سطح، ناهمواری سطح، و واگرایی هندسی بر انتشار صوت در قطعه تأثیر می‌گذارد. چالش اصلی در این روش تشخیص منبعی است که باعث تغییر در انتشار صوت می‌شود. از این رو، این تکنیک تنها زمانی عملی است که انتشار صوت شناسایی شده ناشی از ضربه را بتوان با صوت مرجع مقایسه کرد [۲۵].

یون[1] و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک رویکرد مدیریت پایش سلامت برای نظارت بر سلامت، تشخیص عیب و کنترل کیفیت تجهیزات AM را مورد مطالعه قرار دادند. این رویکرد شامل استفاده از حسگرهای انتشار صوتی و امکان‌سنجی کاربرد آن در چاپگر مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده (FDM) بود. در این تحقیق چاپگر با و بدون تسمه محرک خراب کار می‌کرد. در طی این فرآیند، پنج مجموعه پیچ و مهره برای هر شرایط تولید شد. تصاویر مربوط به تفاوت کیفیت قطعات چاپ شده و تحلیل سیگنال انتشار صوتی انجام شده بر روی آزمایش‌ها، توانایی آزمون نشرآوایی را در تشخیص خطای شل بودن تسمه محرک ثابت کرد [۲۶].

آزمایش نشرآوایی به عنوان یک روش بازرسی پس از فرآیند و یک تکنیک نظارت درجا برای قطعات تولید شده با روش ساخت افزایشی استفاده شده است.

با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده در مورد سرعت سیگنال‌های انتشار صوتی و زمان صرف شده توسط حسگرهای صوتی برای دریافت سیگنال‌ها، زمان و موقعیت ترک ایجاد شده و انتشار آن را می‌توان تعیین کرد. در این روش شناسایی عیوب با مقایسه مشخصات سیگنال یک قطعه شناخته شده از نمونه واجد شرایط و بدون نقص و مشخصات سیگنال اندازه‌گیری شده قطعه چاپ شده به دست می‌آید. هنگامی که نمایه صوتی سیگنال‌های صوتی را با دامنه ثلبت در یک بخش بدون نقص نشان می‌دهد، افت ناگهانی دامنه سیگنال‌های صوتی در پروفایل صوتی برای قطعات چاپ شده دارای نقص وجود دارد. مزایا و معایب روش نشرآوایی در جدول ۹ ذکر شده است [۲۶].

جدول ۹) مزایا و معایب آزمون نشرآوایی در قطعات AM

مزایا	معایب
شناسایی محل شروع و انتشار ترک	غیرقابل پیش‌بینی بودن مشخصه سیگنال منتشر شده
بازرسی کل حجم قطعه	نیاز به اپراتور ماهر
نظارت مستمر	نیاز به تحلیل سیگنال
عدم نیاز به اسکن نقطه‌به‌نقطه	

[1] Yoon

۱۱- آزمون دمانگاری (TT)

آزمون دمانگاری داده‌های حرارتی سطحی را با کارایی، ایمنی و سرعت بازرسی سریع به دست می‌آورد. در این روش تابش مادون قرمز ساطع شده توسط اجسام برای قرار گرفتن در دمای معین به دست می‌آید و این تابش ممکن است منعکس، جذب یا منتقل شود. اجسام سیاه ظرفیت جذب تمام تشعشعات را دارند، اما این یک وضعیت ایده آل می‌باشد و اجسام واقعی دارای ضریب انتشار (ε) کمتر از ۱ هستند که رابطه بین انتشار یک جسم بازرسی شده و یک جسم ایده آل را نشان می‌دهد [۲۷].

دوربین‌های دمانگاری تابش ساطع شده را می‌گیرند و پاسخ الکتریکی دوربین را به توزیع دمای هر جسم تبدیل می‌کنند. هر پیکسل از دمانگارها مقدار دمای واقعی هر ناحیه متمرکز شده توسط دوربین را نشان می‌دهد.

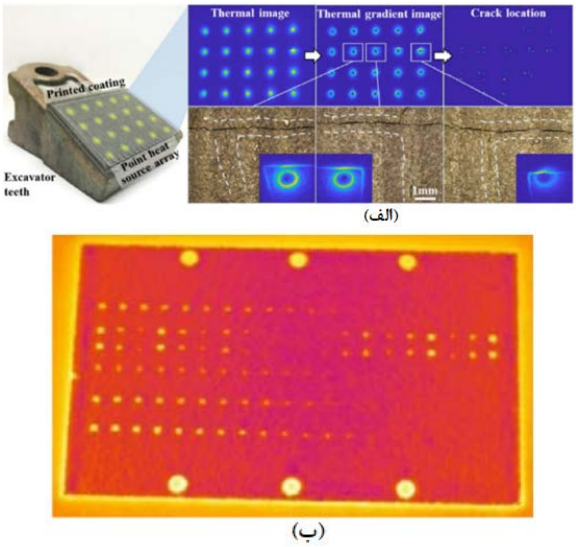
در این تکنیک اندازه نقص تأثیر زیادی در نتایج دارد زیرا نقص‌های کاهش یافته کمتر از ۵۰۰ تا ۶۰۰ میکرومتر در این آزمون شناسایی نمی‌شوند. موج حرارتی در ماده مورد مطالعه منتشر می‌شود و هر گونه نقص در ماده بر سرعت انتشار گرما تأثیر می‌گذارد. دمای گذرا ماده مورد مطالعه برای تعیین کمیت هندسه عیوب استفاده می‌شود. TT معمولاً به تشخیص الگو بر اساس الگوریتم‌های تشخیص تصویر به منظور شناسایی الگوهای مرتبط با پیک‌های حرارتی نیاز دارد. این تکنیک به دلیل سرعت انتشار حرارت بالا، درصد خطای پایینی را هنگام تشخیص عیوب فراهم می‌کند.

دمانگاری میدان دمای سطح جسم مورد مطالعه را اندازه‌گیری کرده و بر اساس تفاوت در رفتار حرارتی بین ساختار داخلی جسم مورد بررسی به شناسایی عیوب می‌پردازد. ناپیوستگی‌ها بر جریان گرما تأثیر می‌گذارند و با نرخ‌هایی متفاوت از حجم مواد گرم یا سرد می‌شوند. از این رو، اختلاف دما در سطح جسم وجود دارد که منجر به تغییرات تابش ساطع شده توسط دوربین مادون قرمز می‌شود.

دمانگاری را می‌توان با دو رویکرد فعال و غیرفعال اعمال کرد. در رویکرد غیرفعال، توزیع حرارت طبیعی بر روی سطح ماده بازرسی شده کمی سازی می‌شود. این روش معمولاً در پایش دما استفاده می‌شود. در دمانگاری فعال، گرمایش یا سرمایش القایی که به عنوان یک محرک خارجی نیز شناخته می‌شود، بر روی ماده مورد بازرسی اعمال می‌شود و مشخصات توزیع دما در سراسر سطح آن اندازه‌گیری می‌شود. دمانگاری فعال رویکردی است که در NDT اتخاذ شده است و هدف آن ایجاد کنتراست حرارتی در عیوب زیرسطحی است. روش‌های تحریک مختلفی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به صورت نوری، مکانیکی یا القایی طبقه‌بندی کرد. تحریک نوری رایج‌ترین روشی است که در آن از نور برای رساندن انرژی به جسم مورد بازرسی استفاده می‌شود. گرما از تحریک اعمال شده تولید می‌شود و از سطح جسم به صورت امواج حرارتی منتشر می‌شود. همان‌طور که ناپیوستگی‌ها سرعت انتشار امواج حرارتی را تغییر می‌دهند، یک کنتراست حرارتی در سطح مستقیماً بالای عیوب ایجاد می‌شود [۲۸].

در دمانگاری فعال لیزر به عنوان منبع تحریک استفاده می‌شود و دمای سطح نمونه تحت نظارت قرار می‌گیرد. به طور کلی، سه جزء در NDT با استفاده از دمانگاری فعال درگیر هستند که شامل منبع تحریک، دوربین مادون قرمز، و یک الگوریتم پردازش داده برای بهبود محتوای سیگنال به نویز داده‌ها است.

انواع عیب‌های متداول از جمله ترک‌ها و لایه‌لایه شدن در مواد کامپوزیتی را می‌توان با دمانگاری فعال تشخیص داد. در خصوص بازرسی قطعات ساخته شده به روش AM، دمانگاری نسبت به سایر تکنیک‌ها حساسیت کمتری به اثر زبری سطح دارد. انتخاب منبع تحریک بستگی به نوع عیوب موردنظر دارد. مطالعات نشان می‌دهد استفاده از لیزر یا لامپ فلاش به عنوان روش گرمایش سطح در دمانگاری ، ترک‌های سطحی با عرض کمتر از ۱ میلی‌متر را با نسبت‌های مناسب آشکار می‌کند. شکل ۸ تصویر حرارتی محل عیوب مصنوعی ایجاد شده در یک قطعه AM را نشان می‌دهد [۲۹].



شکل ۸) الف) تصویر حرارتی نشان‌دهنده محل ترک. ب) دمانگاری یک ماده AM دارای عیوب مصنوعی [۲۹]

دمانگاری همچنین می‌تواند برای نظارت درجا در فرآیندهای ساخت افزایشی مورد استفاده قرار گیرد. ابولنور[1] و همکاران به تشخیص عیب با نظارت درجا در فرآیند ساخت افزایشی FDM با استفاده از تصویربرداری نوری و دمانگاری پرداختند [۳۰].

تغییر در ضخامت لایه پودر را می‌توان بر اساس این تئوری که یک لایه نازک‌تر از پودر سریع‌تر از لایه ضخیم‌تر گرم می‌شود، با دمانگاری بلافاصله پس از پوشش مجدد شناسایی کرد. نقص‌های مصنوعی با اندازه تا ۱۰۰ میکرومتر نیز از طریق اندازه‌گیری تکامل زمانی و توزیع فضایی تابش کل در طول هر بار قرار گرفتن در معرض یک لایه جدید قابل تشخیص می‌باشند. دمانگاری فعال برای نظارت در محل فرآیندهای AM مناسب است [۲۹].

در دمانگاری مورد استفاده در فرآیند SLM انجماد و رسوب پودر می‌تواند پایش و ارزیابی شود. از این رو، نقاط داغ را می‌توان در مراحل اولیه در طول فرآیند انجماد برای کمک به اصلاح پارامترهای چاپ تشخیص داد. مزایا و معایب روش آزمون دمانگاری در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰) مزایا و معایب آزمون دمانگاری در قطعات AM

مزایا	معایب
روش بازرسی نسبتاً سریع	تشخیص عیوب زیرسطحی
مناسب برای شرایط القای دمایی	نیاز به اپراتور ماهر
انجام بازرسی حتی در فاصله زیاد از نمونه	نیاز به کالیبراسیون دقیق
امکان بازرسی سطوح غیر قابل دسترس	

۱۲- نتیجه‌گیری

استفاده از آزمون‌های غیر مخرب در تولید قطعات به روش ساخت افزایشی برای اطمینان از تولید کارآمد قطعات و اینکه رسوب‌گذاری مواد با دقت و بدون ناپیوستگی انجام می‌شود، امری حیاتی به شمار می‌رود. در این تحقیق انواع متنوع تکنیک‌های NDT اعمال شده در تولید قطعات مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌های غیر مخرب مورد استفاده در بازرسی قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی شامل بازرسی چشمی، آزمون مایع نافذ، آزمون ذرات مغناطیسی، آزمون فراصوتی، آزمون جریان گردابی، آزمون روبش سی تی با پرتو ایکس، آزمون نشرآوایی و آزمون دمانگاری است. برخی از این تکنیک‌ها از جمله بازرسی چشمی، آزمون فراصوتی ، آزمون دمانگاری و نشرآوایی همچنین می‌توانند به عنوان روش‌های بازرسی درجا هنگام تولید قطعات نیز مورد استفاده قرار گیرند.

کاربردهای هر یک از روش‌های غیر مخرب ذکر شده در صنعت AM و مناسب بودن آن‌ها برای بازرسی قطعات ساخته شده با روش AM در این مقاله مورد بحث قرار گرفت.

با توجه به بررسی های انجام شده، بازرسی چشمی عمدتاً در بخش مقدماتی سیستم مدیریت کیفیت کلی در فرآیند تولید به روش AM استفاده می‌شود. این روش برای تشخیص قطع شدن مواد در سطح قطعات تولید شده به روش AM مناسب‌تر است. استفاده از آزمایش مایع نافذ بر روی قطعات ساخته شده به روش AM بدون ماشین‌کاری و

[1] AbouelNour

پرداخت اضافی پس از فرآیند برای شناسایی عیوب ناکارآمد است. کاربرد این روش بر روی قطعات ساخته شده به روش AM محدود بوده و فقط برای مواد فرومغناطیسی قابل استفاده است. همچنین مراجع محدودی در کاربرد آزمایش جریان گردابی برای AM وجود دارد زیرا فقط به مواد رسانای الکتریکی محدود می‌شود. تشخیص موفقیت‌آمیز عیوب بحرانی به شدت به پایان سطح و ساختار دانه‌بندی قطعه آزمایشی که تحت آزمایش جریان گردابی قرار می‌گیرد، بستگی دارد. استفاده از آزمون فراصوتی نیز به عنوان یک تکنیک NDT برای بازرسی عیوب در قطعات ساخته شده به روش AM به صورت درجا و پس از فرآیند، بسیار توصیه شده است. روبش سی تی با پرتو ایکس نیز یک تکنیک NDT مناسب برای تشخیص عیوب داخلی در قطعات پیچیده، تأیید اثربخشی عملیات انجام شده پس از تولید، و مشخص کردن اجزای قطعات ساخته شده با روش AM است. این روش تنها تکنیک NDT است که یک مدل کامل را برای سطح داخلی و خارجی یک نمونه ارائه می‌دهد. استفاده از آزمون دمانگاری در فرآیندهای همجوشی بستر پودری مانند SLM به منظور نظارت درجا بر فرآیند تولید به روش AM امری بسیار سودمند می‌باشد. همچنین آزمون نشر صوتی نیز به عنوان یک روش بازرسی پس از فرآیند، و یک تکنیک نظارت درجا برای تشخیص عیوب قطعات تولید شده به روش AM مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در نتیجه این مقاله اهمیت استفاده از آزمون‌های غیر مخرب در بازرسی و عیب‌یابی قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی را برجسته کرده است که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد. با توجه به مقالات بررسی شده امروزه بیشتر از آزمون فراصوتی، روبش سی تی با پرتو ایکس و دمانگاری در ساخت افزایشی استفاده می گردد.

۱۳- منابع[1]

[1] Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2014), "Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing", *Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*, 5 (12), 221-229.

[2] Beyca, O.F., Hancerliogullari, G. & Yazici, I. (2017), "Additive Manufacturing Technologies and Applications", *Journal of Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, 17 (3), 217–234.

[3] Paschalis, Ch., Ioannis, K., & Dimitrios, T., (2020) , "Non-destructive Quality Control Methods in Additive Manufacturing: A Survey", *Rapid Prototyping Journal*, 20 (5), 777–790.

[4] Alghamdi, S., John, S., Choudhury, N. R., & Dutta, N. K. (2021), "Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges", *Journal of Polymers,* 38 (41), 65-79.

[5] Huskic, A., Senck, S., Mahé, E. & Cayron, C. (2018), "Investigation of New Volumetric Non-destructive Techniques to Characterise Additive Manufacturing Parts", *Welding in the World*, 15 (8), 1049-1057.

[6] Taheri, H. (2018), "Nondestructive Evaluation and In-situ Monitoring for Metal Additive Manufacturing". *A dissertation for the degree of Doctor Of Philosophy, Iowa State University*, 22-42.

[7] Ramírez, I., M´arquez, F. & Papaelias, M., (2023), "Review on Additive Manufacturing and Non-destructive Testing", *Journal of Manufacturing Systems*, 74 (2), 260–286.

[8] Kim, F., Moylan, SP., Garboczi, EJ. & Slotwinski, J., (2017), "Investigation of Pore Structure in Cobalt Chrome Additively Manufactured Parts Using X-ray Computed Tomography and Three-dimensional Image Analysis". *Additive manufacturing*, 21 (5), 23–38.

[9] Lu, Q.Y. & Wong, C.H. (2017), "Applications of Non-destructive Testing Techniques for Post-process Control of Additively Manufactured Parts", *Virtual and Physical Prototyping*, 13 (2), 39-48.

[10] Johnson, A., Zarezadeh, H., Han, X., Richard Bibb, R. & Harris, R., (2016)." Establishing in-rocess Inspection Requirements for Material Extrusion Additive Manufacturing". *Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference*, 21 (7), 28-37.

[11] Waller, J., Saulsberry, R., Parker, B. & Hodges, K. (2015), "Summary of NDE of Additive Manufacturing Efforts in NASA". *AIP Conference Proceedings*, 11 (3), 51–62.

[12] Waller, J., Saulsberry, R., Parker, B., Hodges, K. & Burke, E., R. (2014). "Nondestructive Evaluation of Additive Manufacturing State-of-the-discipline Report". *National Aeronautics and Space Administration*, 11 (2), 22-35.

[13] Sharratt, B.M., (2015). "Non-destructive Techniques and Technologies for Qualification of Additive Manufactured Parts and Processes".

[1] References

[24]] Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R.K. & Clare, A.T., (2016). "Review of in-situ Process Monitoring and in-situ Metrology for Metal Additive Manufacturing". *Materials & Design*, 95 (12), 431–445.

[25] Lu, Q.Y. & Wong, C.H. (2017), "Additive Manufacturing Process Monitoring and Control by Non-destructive Testing Techniques: Challenges and in-process Monitoring", *Virtual and Physical Prototyping*, 13 (2), 39-48.

[26] Yoon, J., He, D. & Van Hecke, B. (2014). "A PHM Approach to Additive Manufacturing Equipment Health Monitoring, Fault Diagnosis and Quality Control". *Proceedings of the prognostics and health management society conference*, 25 (12), 1–9.

[27] Meshkizadeh, P., Farahani, M., Rezaee Hajideh, M. & Heidari-Rarani, M. (2020), "Implementing Thermal Image Processing Techniques for Enhancing the Detectability of Defects in Thermography of Additive Manufacturing Components". *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 2 (6), 36-45.

[28] Farahani, M., Meshkizadeh, P., Rezaee Hajideh, M. & Heidari-Rarani, M. (2020), " Thermal Signal Reconstruction and Empolyment of K Clustering Method for Inspection of Additive Manufactured Polymer Parts". *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 2 (7), 60-69.

[29] Shi, W., Ren, Z., He, W., Hou, J., Xie, H. & Liu, S. (2021), "A Technique Combining Laser Spot Thermography and Neural Network for Surface Crack Detection in Laser Engineered Net Shaping". *Optics and Lasers in Engineering*, 18 (19), 106-124.

[30] AbouelNour, Y. & Gupta, N., (2023). "Assisted Defect Detection by in-process Monitoring of Additive Manufacturing Using Optical Imaging and Infrared Thermography". *Additive Manufacturing*, 67 (2), 64–71.

Atlantic Research Centre, 13 (4), 87-99.

[14] Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R., (2017). "Material Issues in Additive Manufacturing: A Review". *Journal of Manufacturing Processes*, 25 (3), 185–200.

[15] Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T., Cruz, M., F. & Borille, A., V., (2015). "Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components". *Procedia CIRP*, 35 (1), 55–60.

[16] Yu, J., Zhang, D., Li, H., Song, C., Zhou, X., Shen, S., Zhang, G., Yang, Y. & Wang, H. (2020)."Detection of Internal Holes in Additive Manufactured Ti-6Al-4V Part Using Laser Ultrasonic Testing". *Applied Sciences* , 10 (1), 358-365.

[17] Khalid, MY., Imran, R., Arif, ZU., Akram, N., Arshad, H., Al Rashid, A. & García M´arquez, FP. (2021), "Developments in Chemical Treatments, Manufacturing techniques and Potential Applications of Natural-fibers-based Biodegradable Composites". *Coatings*, 11 (3), 29-38.

[18] Du, W., Bai, Q., Wang, Y. & Zhang, B. (2018), "Eddy Current Detection of Subsurface Defects for Additive/subtractive Hybrid Manufacturing". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95 (31), 85–95.

[19] Ehlers, H., Pelkner, M. & Thewes, R. (2022), "Online Process Monitoring for Additive Manufacturing using Eddy Current Testing with Magnetoresistive Sensor Arrays". IEEE Sens, 10 (31), 871-890.

[20] Kemerling, B. & Ryan, D. (2019), "Development of Production Eddy Current Inspection Process for Additively Manufactured Industrial Gas Turbine Engine Components". *Proc Turbo Expo: Power Land, Sea, Air*, 12 (8), 15-21.

[21] Biswal, R., Zhang, X., Shamir, M., Al Mamun, A., Awd, M., Walther, F. & Khadar Syed, A. (2019),"Interrupted Fatigue Testing with Periodic Tomography to Monitor Porosity Defects in Wire + arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V". *Additive Manufacturing* , 28 (5), 17–27.

[22] Kim, FH., Pintar, A., Obaton, A-F., Fox, J., Tarr, J. & Donmez, A. (2021), "Merging Experiments and Computer Simulations in X-ray Computed Tomography Probability of Detection Analysis of Additive Manufacturing Flaws". *NDT & E International,* 119 (10), 16-24.

[23] Senck, S., Happl, M., Scheerer, M., Glinz, J., Reiter, T. & Kastner, J. (2021), "Quantification of Surface-near Porosity in Additively Manufactured Aluminum Brackets Using X-ray Microcomputed Tomography". *Proc AIAA Scitech,* 39 (13), 36-51.