بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بررسی سه بعدی ساختار دانه‌بندی فولادهای کربنی با استفاده از میکروسکوپی تمام نگاری دیجیتالی

پگاه عسگری[۱]، یوسف پورویس[۲،۳]، پدرام عبداللهی[۲]، علیرضا مرادی[۱،۴]، رامین خامدی[۲]

[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان
[۲] گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان
[۳] گروه اتمی- مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران
[۴] پژوهشکده اپتیک و فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان

چکیده– شناخت و مطالعه‌ی رفتار کریستالی در آلیاژهای آهنی، به ویژه فولادها و چدن‌ها مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. این مطالعات به دلیل کاربرد وسیع فلزات در صنایع مختلف به ویژه صنایع هوایی، ماشین سازی و صنایع تولید فولاد از اهمیت بسیاری برخوردارند. در این مقاله از میکروسکوپی تمام نگاری دیجیتالی بازتابی برای اندازه‌گیری سه بعدی ساختار کریستالی فولاد کربنی استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که تمام نگاری دیجیتالی روشی موثر و در عین حال ارزان قیمت برای بدست آوردن اطلاعات سه بعدی از تحولات سطحی فولاد با دقت بالا و به صورت غیر تماسی است.

کلید واژه- تمام نگاری دیجیتالی بازتابی، فولاد کربنی، متالوگرافی، میکروسکوپی سه بعدی.

Three-Dimensional investigation of grain structure in carbon steels using digital holographic microscopy

Pegah Asgari[1],Yousef Pourvais[2], Pedram Abdollahi[2], Ali-Reza moradi[1,3], Ramin Khamedi[2]

[1] Department of Physics, University of Zanjan, PO Box 45195-313, Zanjan, Iran
[2] Department of Mechanical engineering, University of Zanjan, PO Box 45195-313, Zanjan, Iran
[3] Department of Physics, University of Tehran, PO Box 14395-547, Tehran, Iran
[4] Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, PO Box 45137-66731, Zanjan, Iran

Abstract- The study of crystal behavior in metallic alloys, specially steels and cast irons has been of great interest to many scientists. These studies are highly important due to the vast application of metallic alloys in different industries .In this paper, reflective digital holographic microscopy (rDHM) method is used for three-dimensional visualization and measurement of crystal structure of carbon steel. The results demonstrate that digital holography is an effective and low-cost technique for acquiring non-contact and high precision 3D information of the surface evolution of alloys.

Keywords: carbon steel, reflective digital holographic microscopy, metallography, 3D microscopy.

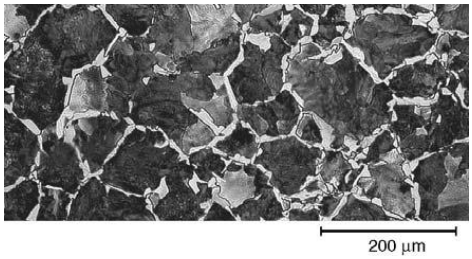
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

هنگامی که یک موج همدوس به یک جسم تابیده می‌شود، شدت موج حامل اطلاعاتی نظیر ضریب بازتاب و جذب و فاز موج نیز نشان دهنده‌ی اطلاعات مربوط به ضخامت و رویه سنجی است. با اندازه‌گیری تغییرات فاز با روش‌های اپتیکی می‌توان اطلاعات سه بعدی مربوط به سطح را به دست آورد. دیگر روش‌های غیر بسیار گران قیمت هستند و نیز در محیط‌های خارج از آزمایشگاه، مانند محیط‌های صنعتی، امکان استفاده از آن‌ها وجود ندارد. این در حالی است که روش‌های اندازه‌گیری اپتیکی ارزان قیمت، غیر مخرب، تمام صفحه و قابل سازگاری با محیط‌های سخت صنعتی هستند [۱]. بسته به شرایط اندازه‌گیری و نمونه، روش‌های اپتیکی مختلفی به کار می‌رود. روش ماره [۲و۳]، روش تداخل سنجی لک و پیس [۴] و تمام نگاری [۵] نمونه‌هایی از این روش‌های اپتیکی هستند. از این بین روش تمام‌نگاری روشی دقیق و پرکاربرد است. این روش ابتدا توسط دنیس گابور [۱] ابداع گردید و در دهه‌های گذشته بسیار توسعه یافته است [۶]. در این روش با استفاده از طرح تداخلی دو موج که حاوی اطلاعات فازی از جسم هستند می‌توان اطلاعات بعد سوم را استخراج کرد. در تمام نگاری بازتابی از طرح تداخلی بین موج بازتابی از جسم و موج مرجع استفاده می‌شود. در تمام نگاری دیجیتالی با استفاده از دوربین دیجیتالی می‌توان فرآیند سخت و زمان‌بر ثبت شیمیایی تمام نگاشت را حذف نمود و از طرفی به جای بازسازی با یک موج مرجع فیزیکی، با استفاده از روش‌های عددی و برنامه‌نویسی بازسازی را به صورت دیجیتالی انجام داد [۵].

فلزات مهم‌ترین و پرکاربردترین مواد اولیه در صنعت هستند. از این رو درک صحیح ویژگی‌های این مواد به ویژه خواص مکانیکی آن‌ها از اهمیت بسیار بالای علمی و صنعتی برخوردار است. مواد فلزی در مقیاس میکروسکوپی از فازهای مختلفی تشکیل شده‌اند که خواص و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. شکل (۱) نمونه‌ای از ساختار این فازها در سطح فولاد را نشان می‌دهد. بنابراین شناخت و درک درست از رفتار و ویژگی‌های این دانه‌های کریستالی در فلزات از اهمیت زیادی برخوردار است[۷].



شکل ۱: دانه بندی روی فولاد A1015 [۶]

در علم مواد تکنیک‌های متفاوتی برای بدست آوردن نمایه‌ی ارتفاع سطح نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تکنیک‌ها میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) هستند که هر کدام مزایای خاص خودشان را دارند. در این مقاله روش میکروسکوپی تمام نگاری دیجیتالی برای تعیین نمایه‌ی سطح دانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و تصاویر سه بعدی از سطح نمونه با تفکیک میکرونی، ارتفاع دانه‌ها بدست آمده است. با استفاده از این روش می‌توان ساختار میکروسکوپی فلزات و همچنین تحولات این ساختار و خواص دانه‌ها را اندازه‌گیری کرد. دقت بالا، عدم محدودیت در جنس سطوح مورد بررسی و شرایط محیط آزمایش، نرخ اندازه‌گیری بالا و اندازه‌گیری سه بعدی ساختار میکروسکوپی از مزایای این روش هستند [۹].

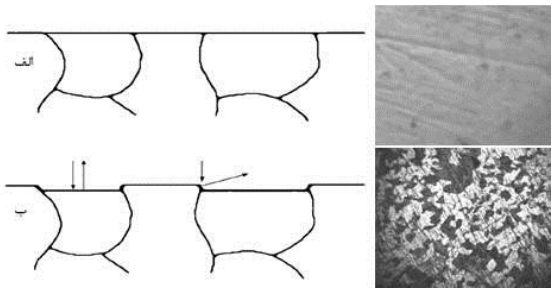
در بخش بعد فرآیند آماده‌سازی نمونه شرح داده شده است. سپس چیدمان و نحوه‌ی انجام آزمایش ها توضیح داده شده و نتایج تجربی بدست آمده ارائه و تحلیل شده‌اند.

آماده سازی نمونه

در این مقاله از یک میل گرد با قطر ۲۰ میلی‌متر از جنس فولاد CK45 استفاده شده است. ابتدا با سمباده زنی، سطح نمونه مورد نظر صاف و صیقلی می‌شود. در چندین مرحله سطح فولاد با درجه‌های متفاوت سمباده‌های متالوگرافی (از درجه‌ی ۱۸۰ تا درجه‌ی ۳۰۰۰) پولیش داده شده است تا یک سطح یک دست و آینه‌ای به دست آید. برای آشکار شدن مرز بین دانه‌های کریستالی فولاد پس از سایش، آن را داخل محلولی اسیدی قرار می‌دهیم تا سطح روی دانه‌ها خورده شود و مرز میان دانه‌ها مشخص شود. به این فرآیند اچ کردن می‌گویند. میزان خوردگی سطح هر دانه به جهت‌گیری کریستال‌های مربوط به آن و میزان ناخالصی به ویژه کربن بستگی دارد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است در فرآیند اچ شدن برخی دانه‌ها کم‌تر و برخی بیشتر خورده می‌شوند.



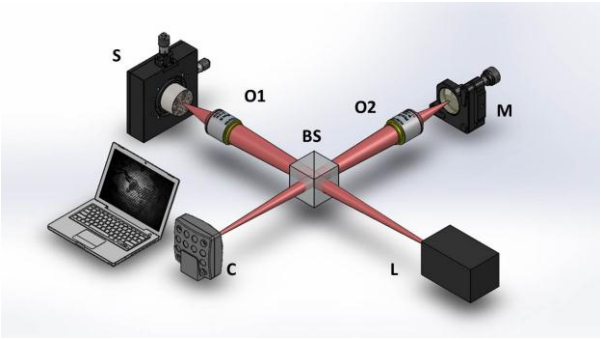
شکل ۲: الف) سطح پولیش زده شده. ب) سطحی که در معرض اسید قرار گرفته و دچار خوردگی می‌شود.

تنها نیمی از نمونه را داخل محلول اچ کرده و ۲۰ ثانیه در آن نگه داشته‌ایم تا نمونه به صورت شکل (۳) درآید. نیمه‌ای اچ شدن نمونه در بازسازی تمام نگاشت نقش مهمی دارد، چرا که نیمه‌ی اچ نشده‌ی نمونه برای ثبت تمام نگاشت مرجع و نیمه‌ی اچ شده برای ثبت تمام نگاشت نمونه استفاده می‌شود. برای ثبت تمام نگاشت مرجع نمی‌توان از یک سطح صاف استاندارد مانند آینه استفاده کرد زیرا هرگونه تغییر در چیدمان و جابه‌جایی و تعویض نمونه با آینه می‌تواند انحنای میدان کانونی شده را تغییر دهد و از دقت اندازه گیری بکاهد. در حالی که می‌توان با یک جابه‌جاگر میکرومتری نمونه را در راستای x و y جابه‌جا و از نیمه‌ی اچ نشده تصویر تمام نگاشت مرجع را ثبت کرد بی آن که تغییری در میزان کانونی شدن به وجود آید.

شکل ۳ تصویر نیمه اچ شده. سمت چپ اچ نشده و سمت راست اچ شده است. تصویر دوربین در نیمه‌ی راست آینه‌ای معلوم است.

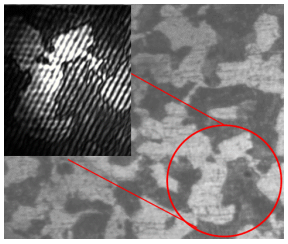
چیدمان آزمایش و نتایج تجربی

چیدمان تمام نگاری دیجیتالی در شکل (۴) نشان داده شده است. این چیدمان در واقع تداخل سنج مایکلسون است که با قرار دادن دو شیئی یکسان (۱۰X) در برابر موج مرجع و موج نمونه تبدیل به چیدمان میکروسکوپی تمام نگاری دیجیتالی بازتابی شده است. و با قرار دادن یک چشمه‌ی نور سفید به جای لیزر (هلیم-نئون با طول موج ۶۳۲٫۸ نانومتر) و مسدود کردن مسیر موج مرجع، تصویر میکروسکوپی معمولی در آشکارساز (دوربین CMOS, DCC1545M, Thorlabs) ثبت می‌شود.



شکل ۴ تصویر چیدمان، L: لیزر هلیم نئون، O1 و O2: شیئی میکروسکوپی ۱۰X، BS: باریکه شکن، C: دوربین CCD، M: آینه و S: نمونه فولادی.

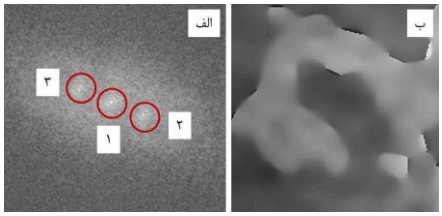
طرح تداخل ناشی از موج مرجع و موج نمونه همان تمام نگاشت را تشکیل می‌دهد. شکل (۵) تصویر میکروسکوپی معمولی سطح فولاد را به همراه تمام نگاشت متناظر با آن نشان می‌دهد.



شکل ۵ تصویر میکروسکوپی و تصویر تمام نگاشت

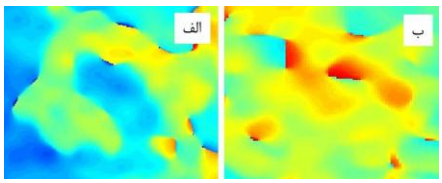
بازسازی آن به روش انتشار طیف زاویه‌ای انجام می‌گیرد. در روش انتشار طیف زاویه‌ای انتگرال پراش و انتشار عددی تابع روزنه در صفحه‌ی روزنه انجام می‌شود [۵]. تبدیل فوریه‌ی تمام نگاشت در فضای فرکانس فضایی مطابق شکل (۶ الف) است که منطقه‌ی میانی روی مبدأ توصیف کننده‌ی موج مرجع و نمونه و دو لکه‌ی واقع در طرفین مبدأ حامل اطلاعات فازی مرتبط به جملات تصاویر مجازی و حقیقی در تمام نگاری هستند. با انتخاب منطقه‌ی ۲، نقشه‌ی فاز به دست می‌آید. این نقشه‌ی فاز باید با روش مناسب پیوسته سازی شود. که در این‌جا با توجه به شکل دانه‌بندی که تعداد زیادی شکستگی را شامل می‌شود از الگوریتم unwrap_Goldstein [۸] استفاده شده است. شکل (۶ ب) نقشه‌ی فاز پیوسته مربوط به قسمتی از سطح فولاد را نشان می‌دهد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]



شکل ۶: الف) طیف تبدیل فوریه ب) نقشه‌ی فاز پیوسته .

در فرآیند بازسازی به یک تمام نگاشت مرجع نیاز است تا اثرات ابیراهی قطعات اپتیکی چیدمان آزمایش و نویزها حذف شوند. به همین دلیل کیفیت تمام نگاشت مرجع نقش مهمی در دقت اندازه‌گیری ایفا می‌کند. به عنوان مثال در شکل (۷) نتیجه‌ی بازسازی یک تمام نگاشت نمونه با دو تمام نگاشت مرجع متفاوت (یکی با روش میانگین‌گیری روی تمام نگاشت مربوط به چندین بخش نمونه‌ی اچ شده و دیگری با استفاده از نیمه‌ی اچ نشده‌ی نمونه) نشان داده شده است. روش ارائه شده در این مقاله مبنی بر تهیه‌ی تمام نگاشت مرجع از نیمه‌ی اچ نشده‌ی نمونه تاثیر بسزایی در افزایش دقت اندازه‌گیری نمایه‌ی نمونه متالوگرافی دارد. در کارهای مشابه به دلیل عدم امکان تهیه‌ی تمام نگاشت مرجع مناسب، تنها تغییرات ساختار کریستالی ثبت شده و خود ساختار کریستالی قبل و بعد از اعمال تغییرات بررسی نشده است[۹].

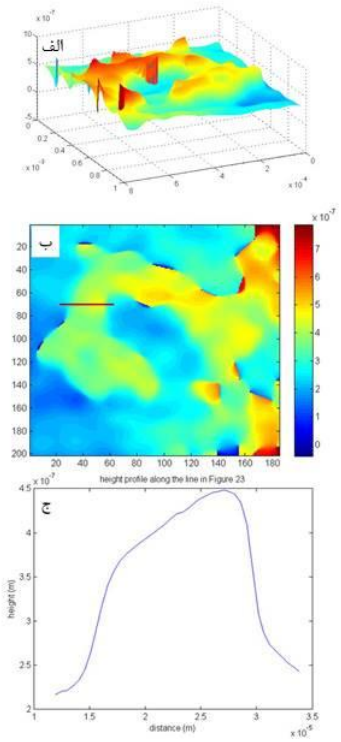


شکل ۷: فاز بازسازی شده الف) با تمام نگاشت مرجع حاصل از نیمه‌ی اچ نشده. ب) با تمام نگاشت مرجع حاصل از میانگین‌گیری.

در شکل (۸) نتایج حاصل از بازسازی تمام نگاشت شکل (۵) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸ ب) نشان داده شده است، میزان افت و خیز دانه‌بندی سطح فولاد از مقیاس میکرومتر است.

نتیجه گیری

نتایج اولیه‌ی ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهند که روش میکروسکوپی تمام نگاری دیجیتالی روشی کارآمد جهت اندازه‌گیری و مطالعه‌ی سه بعدی ساختار کریستالی فلزات است. استفاده از این روش با توجه به موثر و ارزان بودن آن نسبت به روش‌هایی مانند SEM و اسکن پرتو ایکس برای پیشبرد مقاصد مختلف در علم متالورژی، مهندسی مکانیک و به ویژه مهندسی خوردگی بسیار مفید خواهد بود. مطالعه و اندازه‌گیری دقیق تغییرات سه بعدی اثر بارگذاری مکانیکی و حرارتی بر دانه بندی آلیاژ فولاد دوفازی با استفاده از میکروسکوپی تمام نگاری دیجیتالی در حال انجام است.



شکل ۸: الف) تصویر ۳ بعدی بازسازی شده شکل۶. ب) تصویر دوبعدی ج) تصویر ۱ بعدی در راستای خط قرمز.

مراجع

[1] Asundi, Anand. Digital holography for MEMS and microsystem metrology. Vol. 7. John Wiley & Sons, 2011.
[2] Pourvais, Y., P. Asgari, A. R. Moradi, and O. Rahmani. "Experimental and finite element analysis of higher order behaviour of sandwich beams using digital projection moiré." Polymer Testing 38 (2014): 7-17.
[3] Rasouli, S., and M. T. Tavassoly. "Specification of vibrational modes and amplitudes in large-scale structure by time averaging moiré technique." In Proc. of SPIE Vol. 5856, p. 747. 2005.
[4] Leendertz, J. A. "Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect." Journal of Physics E: Scientific Instruments 3.3 (1970): 214.
[5] Fathi, Narges, et al. "Digital holographic microscopy of the myelin figure structural dynamics and the effect of thermal gradient." Biomedical optics express 4.6 (2013): 950-957.
[6] Xu, Lei, et al. "Studies of digital microscopic holography with applications to microstructure testing." Applied Optics 40.28 (2001): 5046-5051.
[7]E. A. Holm, P. M. Duxbury. "Three-dimensional materials science." Scripta materialia 54.6 (2006): 1035-1040.
[8] Goldstein, R. M., et al. "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping." Radio Science 23, no. 4 (1988): 713-720.
[9] B. P. Thiesing , et al., “High temperature measurements of martensitic transformations using digital holography” , APPLIED OPTICS / Vol. 52, No. 19 / 1 July 2013

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]