



دانشگاه شهید باهنر کرمان



انجمن پژوهش‌های آزمایشگاهی غیرمخرب ایران

هفتمین کنفرانس ملی
آزمایش‌ها غیرمخرب

سیزدهمین کنفرانس ملی
جوهر پلاست

۶ و ۷ دی ماه سال ۱۳۹۱ - دانشگاه شهید باهنر کرمان

بررسی تغییرات ریزساختاری در نتیجه‌ی آنیل نمونه‌های فولادی کم کربن کار سرد شده به روش غیر مخرب جریان گردابی

مصطفی سیف پور^۱، مهرداد کاشفی تربتی^۲، محمد مزینانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار گروه مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استادیار گروه مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در دهه‌ی اخیر علاوه بر شناسایی ترک و عیوب که شناخته‌ترین کاربرد آزمون غیر مخرب جریان گردابی می‌باشد، مطالعات زیادی در زمینه‌ی شناسایی و بررسی ریزساختاری مواد با استفاده از این روش انجام گرفته است. در این پژوهش، تأثیر فرایند آنیل نمونه‌های کار سرد شده بر روی خروجی‌های آزمون جریان گردابی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ورق فولادی کم کربن نورد سرد شده در دمای 575°C به مدت زمان‌های مختلف آنیل شد. سپس آزمون جریان گردابی، سختی سنجی و ارزیابی‌های میکروسکوپی بر روی نمونه‌ها انجام شد. آنیل نمونه‌های نورد سرد شده موجب تغییر در چگالی نابجایی‌ها و شکل دانه‌ها می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود که پارامترهای خروجی آزمون جریان گردابی در نتیجه‌ی این فرایند تحت تأثیر قرار بگیرند. نتایج حاصل نشان دهنده‌ی دقت خوب و قابل قبول روش جریان گردابی در مقایسه با دو روش سختی سنجی و ارزیابی‌های میکروسکوپی در مرحله‌ی تبلور مجدد است. با این حال، در مرحله‌ی بازپایی تنها خروجی‌های آزمون جریان گردابی حساسیت خوبی نشان می‌دهند. بنابراین با استفاده از این روش می‌توان با صرف هزینه و زمان کمتر به بررسی دقیق‌تر ریزساختار نمونه‌ها حین تحولاتی که در فرایند آنیل نمونه‌های کار سرد شده اتفاق می‌افتد پرداخت.

کلمات کلیدی: آزمون جریان گردابی، فولاد کم کربن، کار سرد، آنیل

¹ Mostafa.seyfpour@yahoo.com

² M-kashefi@um.ac.ir

³ mazinani@um.ac.ir



انجمن مهندسان پل ایران

به نام خداوند جان و خرد



انجمن مهندسی آرایشهای غیرمخرب ایران

جناب آقای مهندس مصطفی سیف پور

نویسنده محترم مقاله: بررسی تغییرات ریزساختاری در نتیجه ی آتیل نمونه های فولادی کم کربن کار سرد شده به روش غیر مخرب جریان گردابی کدمقاله: ۹۱/۱۱۰

ارائه مقاله از زنده جناب عالی به این کنفرانس نمودی از حرکت راستین شما برای توسعه پلدار کشورمان است چنین کوششی را ارج می نهیم

و از آن تقدیر می نمایم.



عبدالوهاب ادب آوازه

رئیس هیئت مدیره، هیئت کنفرانس ملی جوش و بازرسی

و هیئت کنفرانس ملی آرایشهای غیرمخرب

بررسی تغییرات ریزساختاری در نتیجه‌ی آنیل نمونه‌های فولادی کم کربن کار سرد شده به روش غیر مخرب جریان گردابی

مصطفی سیف پور¹، مهرداد کاشفی تربتی²، محمد مزینانی³
¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد
² دانشیار گروه مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد
³ استادیار گروه مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در دهه‌ی اخیر علاوه بر شناسایی ترک و عیوب که شناخته‌ترین کاربرد آزمون غیر مخرب جریان گردابی می‌باشد، مطالعات زیادی در زمینه‌ی شناسایی و بررسی ریزساختاری مواد با استفاده از این روش انجام گرفته است. در این پژوهش، تأثیر فرایند آنیل نمونه‌های کار سرد شده بر روی خروجی‌های آزمون جریان گردابی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ورق فولادی کم کربن نورد سرد شده در دمای 575°C به مدت زمان‌های مختلف آنیل شد. سپس آزمون جریان گردابی، سختی سنجی و ارزیابی‌های میکروسکوپی بر روی نمونه‌ها انجام شد. آنیل نمونه‌های نورد سرد شده موجب تغییر در چگالی نابجایی‌ها و شکل دانه‌ها می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود که پارامترهای خروجی آزمون جریان گردابی در نتیجه‌ی این فرایند تحت تأثیر قرار بگیرند. نتایج حاصل نشان دهنده‌ی دقت خوب و قابل قبول روش جریان گردابی در مقایسه با دو روش سختی سنجی و ارزیابی‌های میکروسکوپی در مرحله‌ی تبلور مجدد است. با این حال، در مرحله‌ی بازیابی تنها خروجی‌های آزمون جریان گردابی حساسیت خوبی نشان می‌دهند. بنابراین با استفاده از این روش می‌توان با صرف هزینه و زمان کمتر به بررسی دقیق‌تر ریزساختار نمونه‌ها حین تحولاتی که در فرایند آنیل نمونه‌های کار سرد شده اتفاق می‌افتد پرداخت.

کلمات کلیدی: آزمون جریان گردابی، فولاد کم کربن، کار سرد، آنیل

¹ Mostafa.sevfpour@yahoo.com

² M-kashefi@um.ac.ir

³ mazinani@um.ac.ir

در سال‌های اخیر به تعیین خواص متالورژیکی مواد و بدست آوردن نتایج آزمون‌های مخرب با روش غیرمخرب جریان گردابی¹ توجه بسیاری شده است. به کمک این آزمون می‌توان تمام قطعات را در خط تولید، به طور صددرصد و با کمترین هزینه، در کمترین زمان ممکن مورد بررسی قرار داد. حساسیت این آزمون به ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و ریزساختار [1، 2] از جمله اندازه دانه را می‌توان جزء مهم-ترین عواملی دانست که باعث توجه بسیار به این روش شده است.

بازیابی² و تبلور مجدد³ پدیده‌هایی هستند که در حین آنیل فلزات تغییر شکل پلاستیک یافته به وقوع می‌پیوندند. بازیابی شامل از بین رفتن نابجایی‌ها و آرایش مجدد آنها به سمت ساختاری با انرژی کمتر می‌باشد حال آنکه تبلور مجدد شامل تشکیل دانه‌های جدید عاری از کرنش در بخش‌های معینی از ماده می‌باشد که رشد متعاقب این دانه‌ها منجر به مصرف شدن ریزساختار تغییر شکل یافته یا بازیابی شده می‌شود. [3]

نحوه‌ی عملکرد آزمون غیرمخرب جریان گردابی بدین صورت است که با عبور جریان متناوب از یک کویل، میدان مغناطیسی اطراف کویل بوجود می‌آید، هنگامی که کویل حامل جریان نزدیک نمونه‌ی فلزی می‌شود، میدان مغناطیسی اطراف کویل یک سری جریان‌های گردابی در نمونه ایجاد می‌کند که ولتاژ اولیه و ثانویه کویل را تغییر می‌دهد. [4] میزان این تغییرات وابسته به ریزساختار، ترکیب شیمیایی، تنش‌های داخلی، عیوب و همچنین فرکانس مورد آزمایش و فاصله‌ی بین کویل و نمونه می‌باشد. [5]

تحقیقاتی به منظور تعیین برخی از خواص متالورژیکی مواد با استفاده از این آزمون انجام شده است. S.H.Khan [6] و k.Liu [7] در پژوهش‌هایی جداگانه ارتباط خوبی بین درصد فاز مارتنزیت تشکیل شده در نتیجه‌ی نورد سرد فولادهای زنگ‌نزن AISI 304، AISI 321 و AISI 316L و خروجی‌های جریان گردابی بدست آوردند. تعیین عمق دی کربوراسیون بوسیله‌ی آنالیز هارمونیک توسط M.Mercier [8] گزارش شده است، در پژوهشی مرتبط با این موضوع، S.Kahrobae [9] عمق دی-کربوره در فولاد CK45 را مورد بررسی قرار داد. پاسخ جریان گردابی به تنش اعمالی زیر حد الاستیک نمونه‌های آلومینیومی قابل عملیات حرارتی و غیرقابل عملیات حرارتی توسط M.Morozov [10] مورد بررسی قرار گرفت. S.H.Khan [11] و S.Kahrobae [12] از این روش در تعیین درصد پرلیت در فولادهای ساده کربنی استفاده نمودند. تأثیر اندازه‌ی دانه [13-15] و چگالی نابجایی‌ها [16-18] بر خواص مغناطیسی مواد توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است.

¹ Eddy Current Non-destructive method

نمونه‌های آنیل شده در دمای 575°C و همچنین سختی نمونه کار سرد شده را نشان می‌دهد. کاهش سختی پیوسته‌ای با افزایش زمان آنیل مشاهده می‌شود، افت شدید سختی همزمان با شروع فرایند تبلور مجدد (شکل 2-b) و پایان فرایند نرم شدن فولاد در کسر تبلور مجدد حدود 0.9 اتفاق می‌افتد. (شکل 2-f)

نمودار 3 و 4 به ترتیب تغییرات ولتاژ ثانویه و امپدانس نرماله شده‌ی کوئل خواننده را بر حسب زمان آنیل در دمای 575°C نشان می‌دهند، همچنین ولتاژ ثانویه و امپدانس نرماله شده‌ی نمونه‌ی نورد سرد شده به ترتیب در نمودار 3 و 4 نشان داده شده است. در حین فرایند بازیابی چگالی نابجایی‌ها کاهش یافته و ساختار منظم‌تری با انرژی کمتری از نابجایی‌ها ایجاد می‌شود. [3] همزمان با شروع فرایند تبلور مجدد علاوه بر کاهش چگالی نابجایی‌ها که در نتیجه‌ی بازیابی اتفاق می‌افتد، اندازه‌ی متوسط دانه‌ها در نتیجه‌ی جوانه زنی دانه‌های جدید تبلور مجدد یافته کاهش می‌یابد. نفوذپذیری مغناطیسی با کاهش چگالی نابجایی‌ها افزایش و با کاهش اندازه‌ی دانه کاهش می‌یابد. [13-18] با توجه به رابطه‌ی 2، افزایش یا کاهش نفوذپذیری مغناطیسی (μ) به ترتیب موجب افزایش و کاهش ضریب خود القایی (L)¹ می‌شود.

$$L = \mu N^2 A / l \quad (2)$$

μ نفوذپذیری مغناطیسی، N تعداد دور کوئل، A سطح مقطع نمونه و l طول کوئل هستند. نتیجتاً با توجه به روابط زیر تغییر نفوذپذیری مغناطیسی (μ) موجب تغییر مقاومت القایی کوئل (X_L) و امپدانس کوئل (Z) می‌شود.

$$X_L = 2\pi f L \quad (3)$$

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = V / I \quad (4)$$

با توجه به رابطه‌ی 4 تغییر امپدانس موجب تغییر در ولتاژ ثانویه می‌شود.

تا زمان آنیل 45 ثانیه که فقط فرایند بازیابی رخ می‌دهد (شکل 2) کاهش چگالی نابجایی‌ها موجب افزایش ولتاژ ثانویه و امپدانس نرماله شده کوئل خواننده می‌شود. با شروع فرایند تبلور مجدد (شکل 2-b) به دلیل کاهش شدید اندازه‌ی دانه ولتاژ ثانویه و امپدانس کوئل خواننده کاهش می‌یابند. با پیشرفت فرایند تبلور مجدد دانه‌های متبلور شده‌ی بیشتری جایگزین دانه‌های کشیده می‌شوند بنابراین مقادیر ولتاژ ثانویه و امپدانس کوئل خواننده به طور پیوسته کاهش می‌یابند.

نمودار 5، ارتباط بین درصدهای مختلف تبلور مجدد با ولتاژ ثانویه را نشان می‌دهد. ضریب رگرسیون بدست آمده برای این خروجی ($R^2=0.905$) می‌باشد.

نمودار 6، ارتباط بین درصد های مختلف تبلور مجدد با امپدانس نرماله شده کوئل خواننده را نشان می دهد. ضریب رگرسیون بدست آمده برای این خروجی ($R^2=0.971$)، بیانگر ارتباط خوب این پارامتر با درصد های مختلف تبلور مجدد می باشد.

نتیجه گیری

به دلیل حساسیت بالای ولتاژ ثانویه و امپدانس نرماله شده کوئل خواننده به چگالی نابجایی ها از این روش برای نشان دادن فرایند بازیابی می توان استفاده کرد، حال آنکه آزمون سختی و ارزیابی های میکروسکوپی قادر به نشان دادن تغییرات ریزساختاری در این فرایند نمی باشند. در حین تبلور مجدد دانه های جدید که در ریزساختار شکل می گیرند، عامل اصلی کاهش نفوذپذیری مغناطیسی (μ) می باشند. پارامتر های ولتاژ ثانویه و امپدانس نرماله شده کوئل خواننده قادر به دنبال کردن پیشرفت فرایند تبلور مجدد می باشند، خروجی امپدانس نرماله شده دقت بالاتری دارا می باشد. کاهش ولتاژ ثانویه و امپدانس کوئل خواننده در حین تبلور مجدد حاکی از آن است که اثر کاهش اندازه ی دانه ها بر اثر کاهش چگالی نابجایی ها که سعی در افزایش خروجی های جریان گردابی دارند، غالب است. با توجه به تأثیرات متضاد بازیابی و تبلور مجدد بر روی ولتاژ ثانویه و امپدانس نرماله شده ی کوئل خواننده، از این دو پارامتر برای جدا کردن دو فرایند بازیابی و تبلور مجدد و همچنین پیدا کردن شروع تبلور مجدد می توان استفاده کرد.

مراجع

- [1] P. J. Shull, "Nondestructive evaluation: theory, techniques and applications", 2002, New York: Marcel Dekker.
- [2] Don E. Bray, Roderic K. Stanly, "Nondestructive Evaluation", 1997, CRC.
- [3] F. J. Humphreys, M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena" 1996, Oxford, Pergamon Press.
- [4] M. Kashefi, S. Kahrobaee, "On The Application of Non-Destructive Eddy Current Method for Quality Control of Heat Treated Parts" *18th Congress IFHTSE*, Rio de Janeiro, 2010, pp. 4877-4885.
- [5] C. Hellier, "Handbook of nondestructive evaluation", 2001, McGraw-Hill.
- [6] S. H. Khan, Farhad Ali, A. Nusair Khan, M. A. Iqbal, "Eddy Current Detection of Changes in Stainless Steel after Cold Reduction", *Computational Materials Science*, 2008, 43, pp. 623-628.
- [7] K. Liu, Z. Zhao, Z. Zhang, "Eddy Current Assessment of the Cold Rolled Deformation Behavior of AISI 321 Stainless Steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, Vol. 21, pp. 1772-1776.
- [8] D. Mercier, J. Lesage, X. Decoqman and D. Chicot "Eddy currents and hardness

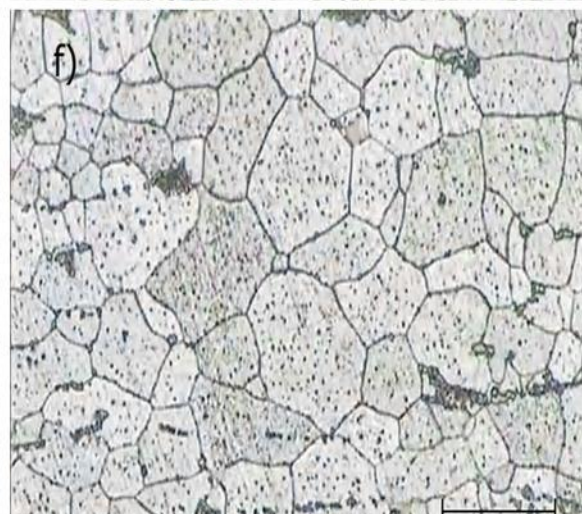
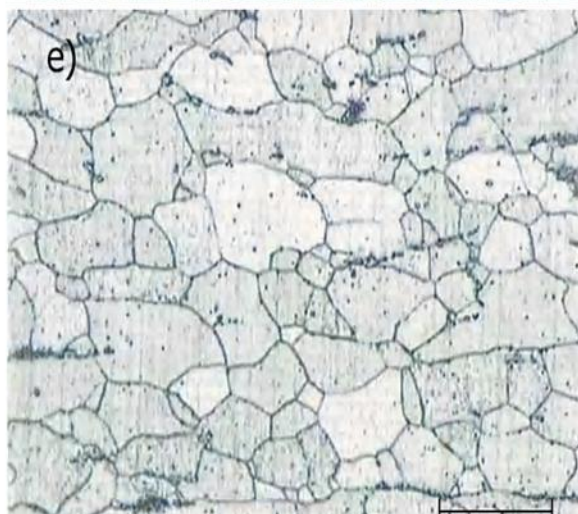
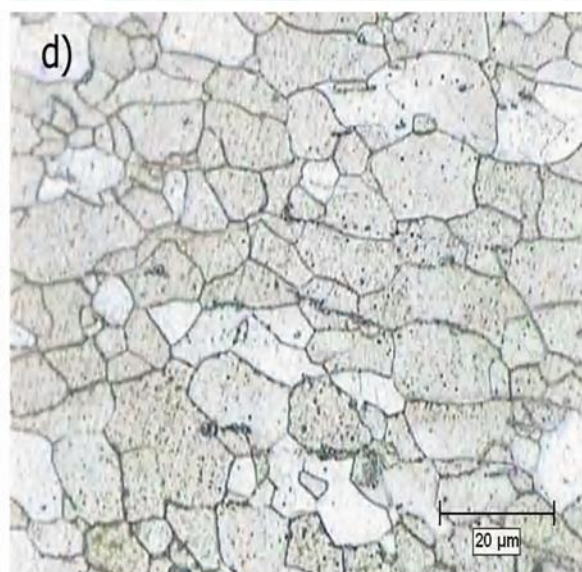
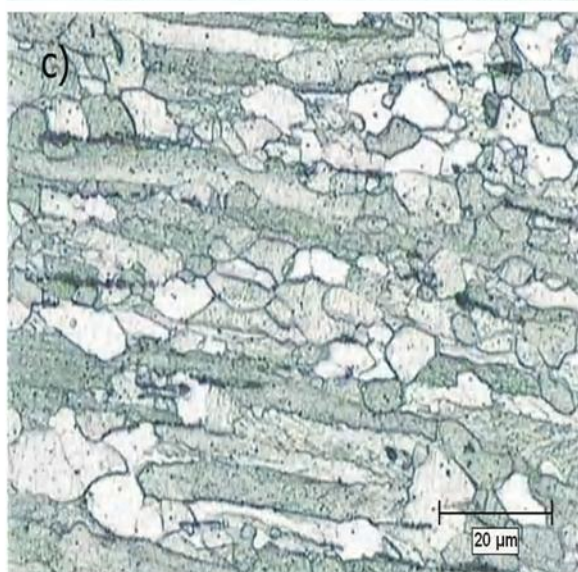
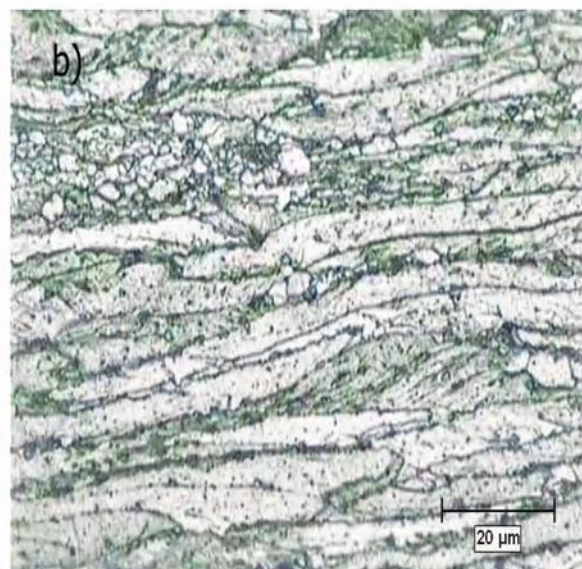
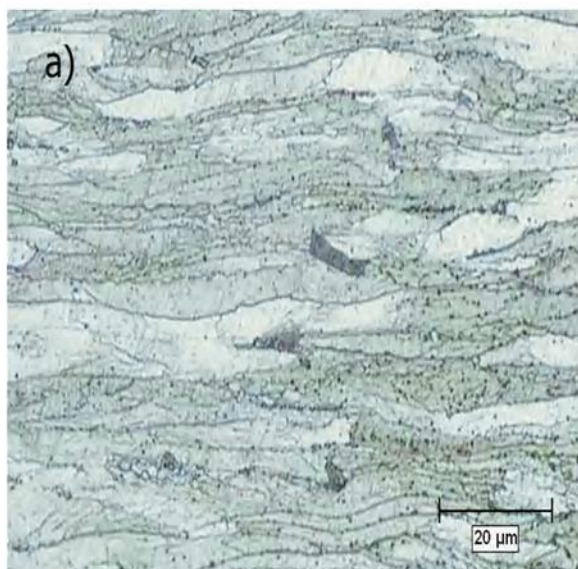
- [9] S. Kahrobaee, M. Kashefi, A. Saheb Alam, "Magnetic NDT Technology for characterization of decarburizing depth," *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, pp. 4083-4088.
- [10] Maxim Morozov, Gui Yun Tian, Philip J. Withers, "The pulsed eddy current response to applied loading of various aluminium alloys", 2010, NDT & E International, vol 43, pp.493-500.
- [11] S. H. Khan, F. Ali, A. Nusair Khan, M.A. Iqbal, "Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method," *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 200, pp. 316-318.
- [12] S. Kahrobaee, M. Kashefi, M.H. Nateq, "Quantitative measuring of pearlite in carbon steels using electromagnetic sensor", *International Journal of Iron and Steel Society of Iran*, 2011, vol 7, pp.29-32.
- [13] J. Degauque, B. Astile, J.L. Porteseil, R. Vergne "Influence of the Grain Size on the Magnetic and Magnetomechanical Properties of High-Purity Iron", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1982, vol 26, p. 261-263.
- [14] J. Anglada-Rivera, L.R. Padovese, J. Capo-Sanchez "Magnetic Barkhausen Noise and Hysteresis Loop in Commercial Carbon Steel: Influence of Applied Stress and Grain Size", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, vol 231, pp.299-306.
- [15] B. K. TANNER, J. A. SZPUNAR, S. N. M. WILLCOCK, L. L. Morgan, P. A. MUNDELL; Magnetic and Metallurgical Properties of High-Tensile Steels, *Journal of Materials Science*, , JMMM, v. 123, p. 283, 1988.
- [16] K. Eloit, A. De Paepe, J. Dilewijns, C. Standaert, "Relation between Magnetic Properties and Changes in Dislocation and Cell Structure due to Cold Deformation", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, 157/158, pp.459-460.
- [17] M. J. Sablik, "Modeling the Effect of Grain Size and Dislocation Density on Hysteretic Magnetic Properties in Steels", *Journal of Applied Physics*, 2001, vol 89, pp.5610-5613.
- [18] H. Trauble, A. E. Berkowitz, E. Kneller, "The influence of crystal defects on magnetization processes in ferromagnetic single crystals" In *Magnetism and Metallurgy*, 1969, vol 2, pp.621.

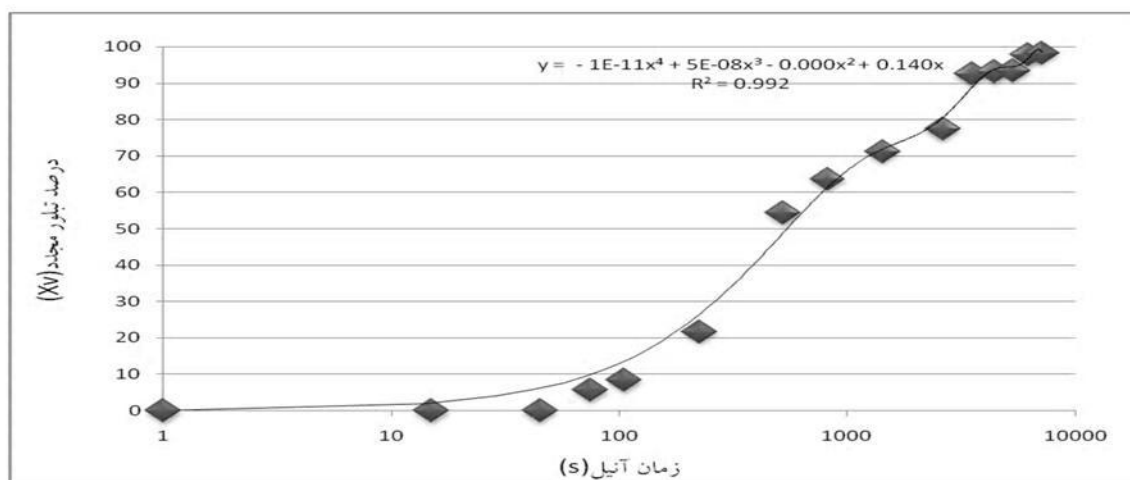
جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این پژوهش بر حسب درصد وزنی

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu	Fe
0.056	0.202	0.007	0.001	0.001	0.035	0.01	0.047	Rem.

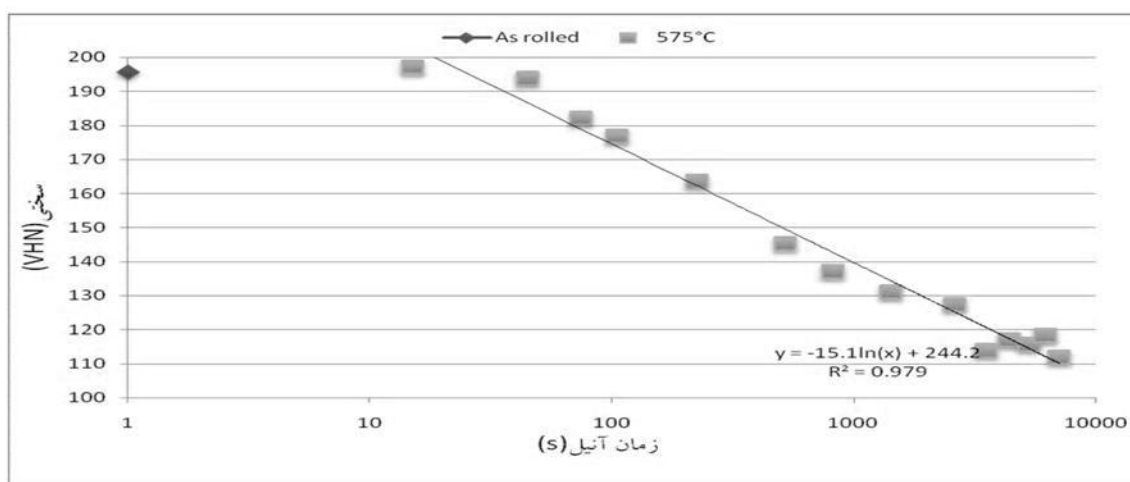


شکل ۱: ریزساختار نمونه‌ی فولادی ۷۵ درصد نورد سرد شده.

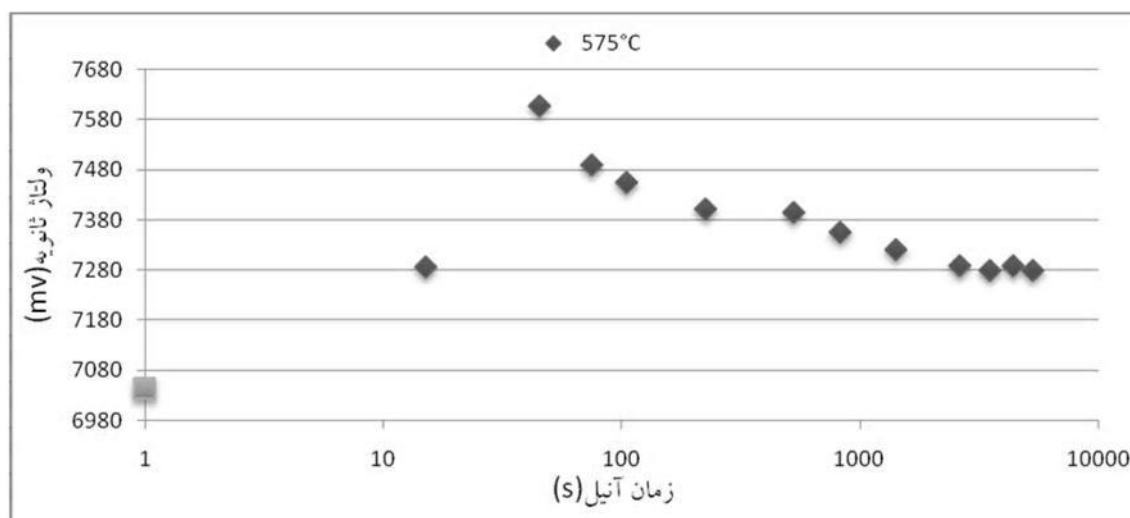


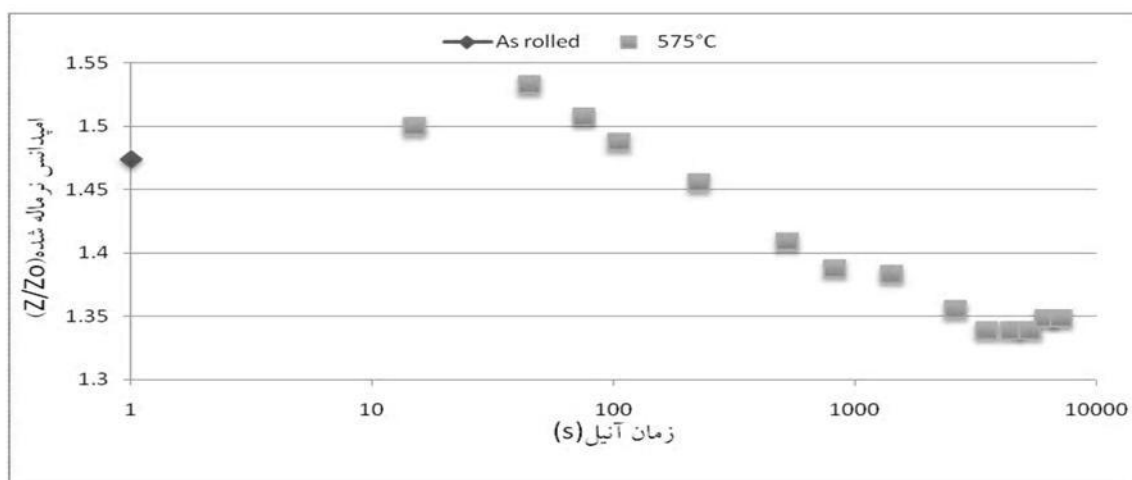


نمودار ۱: درصد تبلور مجدد انجام گرفته در زمان‌های آنیل مختلف در دمای 575°C .

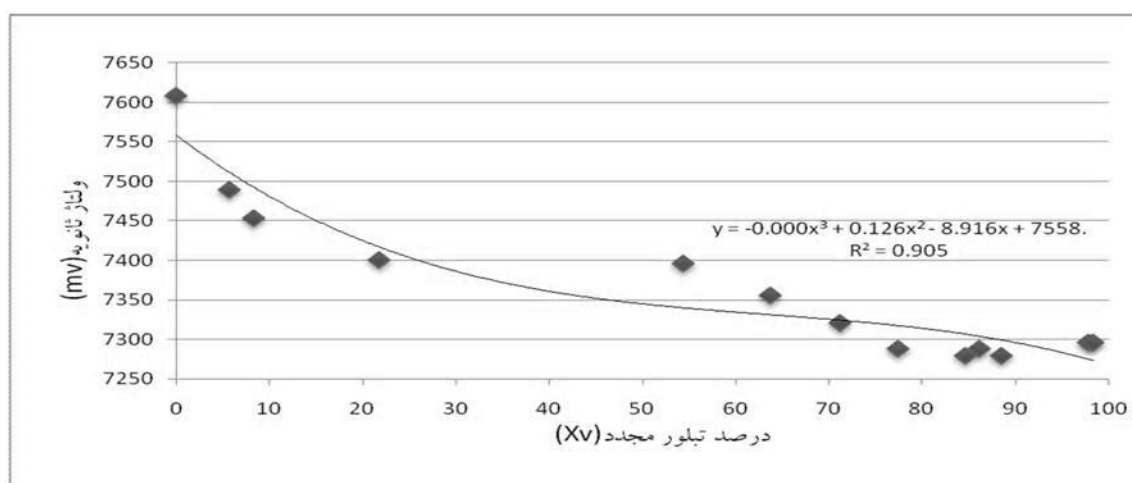


نمودار ۲: سختی نمونه‌های آنیل شده در زمان‌های مختلف در دمای 575°C .

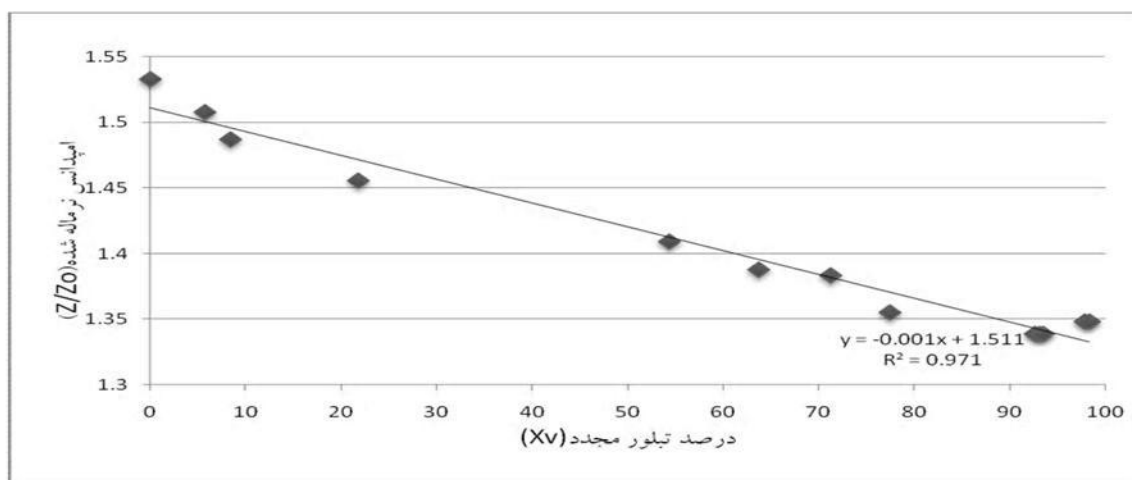




نمودار ۴: تغییرات امپدانس نرماله شده بر حسب زمان آنیل در دمای 575°C .



نمودار ۵: رابطه‌ی درصد تبلور مجدد با ولتاژ ثانویه.



نمودار ۶: رابطه‌ی درصد تبلور مجدد با امپدانس نرماله شده.