http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

دوره ۱۲ شماره ۴ آبان ۱۳۹۱ ص ص ۴۸-۵۸

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۱/۱/۲۳
پذیرش ۹۱/۴/۴
ارائه در سایت ۹۱/۶/۳۰

اندازه‌گیری دقیق خواص مکانیکی میکروساختارهای بازپختی فولاد آلیاژی AISI D6 به کمک روش غیرمخرب فراصوتی

محمد حمیدنیا[۱]، فرهنگ هنرور[۲*]، حمید خرسند[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۳- استادیار مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵، honarvar@kntu.ac.ir

چکیده- آگاهی از خواص مکانیکی فولادها، به دلیل استفاده بسیار وسیع از آن‌ها در صنایع گوناگون، امری ضروری و مهم است. معمولاً از روش‌های مخرب و هزینه‌بر برای اندازه‌گیری این خواص استفاده می‌شود. در این مقاله، برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی فولاد AISI D6 از روش غیرمخرب فراصوتی استفاده شده است. نمونه‌هایی از این فولاد ساخته شده و با اعمال فرایندهای مختلف عملیات حرارتی، ساختارهایی با دانه‌بندی و سختی‌های مختلف ایجاد شده است. برای پیش‌بینی خواص مکانیکی از جمله مدول الاستیسیته (E)، مدول برشی (G)، ضریب پواسون (σ) و مدول حجمی (K)، در این میکروساختارها، سرعت موج طولی و عرضی توسط آزمون فراصوتی با روش‌های غوطه‌وری و تماسی و با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که به کمک روش غیرمخرب فراصوتی می‌توان خواص مکانیکی فولادهایی را که میکروساختارهای آن‌ها اختلاف بسیار جزیی با هم دارند با دقت اندازه‌گیری نمود.

کلیدواژگان: خواص مکانیکی فولاد، روش غیرمخرب فراصوتی، آزمون غوطه‌وری و تماسی، فولاد AISI D6

Accurate measurement of mechanical properties of tempered microstructures of AISI D6 alloy steel by ultrasonic nondestructive method

M. Hamidnia[1], F. Honarvar[2*], H. Khorsand[3]

1- MSc. Student, Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
2- Assoc. Prof., Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
3- Assis. Prof., Material Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
* P. O. B. 19395-1999 Tehran, honarvar@kntu.ac.ir

Abstract- In certain applications, it is improtant to measure the mechanical properties of steel with high accuracy. These properties are usually measured by destructive methods. However, the small changes made during heat treatment processes are not usually detectable by destructive methods. Ultrasonic nondestructive testing is an alternative method that can be used for measuring the mechanical properties of steels. In this paper, the ultrasonic method has been used for measurement of meachanical properties of AISI D6 steel samples processed by various heat treatment processes. Each sample has a differnet microstucture and hardness due to its specific heat treatment. To find the meachanical properties, the velocity of longitudinal and shear ultrasonic waves were measured for each sample. Comparison of the results obtained from ultrasonic measurements with those available in reference tables shows that the ultrasonic nondestructive method can measure the elastic properties of AISI D6 samples with high accuracy.Results show by ultrasonic nondestructive method could achieve the mechanical properties of microstractures with very detail difference.

Keywords: Mechanical Properties of Steel, Ultrasonic Nondestructive Method, Immersion and Contact Testing, AISI D6 Steel

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]

۱- مقدمه

فولاد ابزار سردکار، پرکربن و پرکرم AISI D6، به دلیل ترکیب شیمیایی خاص خود، برای سخت‌شدن و بازپخت[1] مناسب است و پس از بازپخت، برای یک استحکام کششی معین، چقرمگی خوبی دارد. وجود ۱۱/۵ درصد کرم مقاومت سایشی آن را بسیار بالا برده و به همین دلیل بیشتر برای ساخت و شکل‌دهی مواد اصلی از قبیل فلزات، پلاستیک‌ها و چوب به‌کار می‌رود[۱].

زمانی که به منظور بهبود خواص این فولاد نمونه‌ها در معرض عملیات حرارتی قرار می‌گیرند، میکروساختارهای آن‌ها تغییر می‌کند که دانستن خواص مکانیکی بسیار مفید و کاربردی است. این ویژگی‌ها معمولا با روش‌های غیردقیق و مخرب تخمین زده می‌شوند. روش‌های غیرمخرب، علاوه بر اینکه باعث تغییر خواص مکانیکی و فیزیکی میکروساختارها می‌شوند، قابلیت تشخیص تغییرات جزیی میکروساختارها را نیز ندارند[۲].

با مطالعه نحوه انتشار و پراکندگی امواج فراصوتی، می‌توان اطلاعاتی راجع به خواص فیزیکی و مکانیکی میکروساختارها به‌دست آورد[۳].

در سالیان اخیر، مطالعات مختلفی برای تخمین خواص مکانیکی مواد با روش غیرمخرب فراصوتی صورت گرفته است. زمانی که در یک قطعه میکروساختارهای معینی وجود دارد، امواج فراصوتی طولی و عرضی، هنگام عبور از میکروساختار، سرعت مشخصی خواهند داشت. با تعیین اختلاف جزیی سرعت در میکروساختارهای مختلف، می‌توان به اختلاف بسیار ناچیز خواص مکانیکی میکروساختارها پی برد.

راجندران[۴] برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی مواد در دماهای بالا (دمای کوره)، مورثی[۵] برای دست یافتن به خواص نیمونیک ۲۶۳، کارون[۶] برای یافتن خواص میکروساختارهای مختلف سرامیک آلومینیم-زیرکونیم، زاوراه [۷] برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی سرامیک کاربید سیلیکون در دماهای بالا، مورو[۸] برای بررسی خواص فازهای مختلف در فولادهای 304L و 316L، گور[۹] برای شناسایی خواص میکروساختارهای مختلف فولادهای AISI 4140 و AISI 5140 از روش اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی استفاده کرده‌اند.

1. Tempering

در این مقاله، برای بررسی اثر تغییرات جزیی میکرو ساختارها بر روی خواص مکانیکی و آکوستیکی فولاد AISI 6، تمام نمونه‌ها با روشی یکسان تنش‌زدایی و سختکاری شده‌اند و تنها متغیر بین آن‌ها دمای بازپخت بوده است. با اندازه‌گیری دقیق سرعت‌های فراصوتی طولی و عرضی، اختلاف بسیار جزیی خواص مکانیکی میکروساختار نمونه‌ها تشخیص داده شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق، فولاد ابزار سردکار پرکربن و پر کرم AISI D6 (DIN 1.2436) با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول ۱، به دلیل کاربردهای زیاد صنعتی، جهت بررسی و مطالعه انتخاب شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد AISI D6

C	Si	Mn	Cr	W
۲/۱	۰/۲۵	۰/۳	۱۱/۵	۰/۷

برای ایجاد میکروساختارهای مختلف در فولاد AISI D6، شش نمونه استوانه‌ای‌شکل با قطر ۲۵ و ارتفاع ۶ میلی‌متر به گونه‌ای با وایرکات ماشینکاری شده‌اند که سطح نمونه‌ها کاملا موازی و صاف باشند.

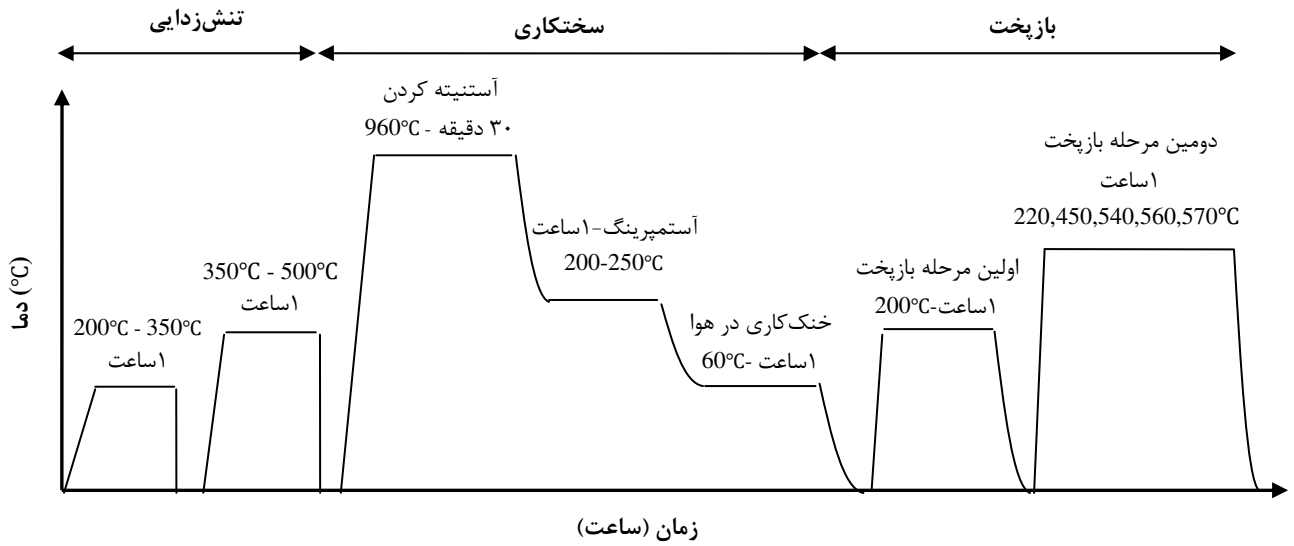
۲-۲- عملیات حرارتی

در فولاد AISI D6، به دلیل ترکیب شیمیایی خاص، می‌توان با تغییر فرایند سختکاری و بازپخت، میکروساختارهای مختلفی ایجاد کرد. بدین منظور پنج نمونه از قطعات ساخته‌شده مطابق پروسه شکل ۱ عملیات حرارتی شده‌اند. به علت تنش‌های داخلی ایجادشده در ضمن سریع سردشدن، تقریبا تمامی قطعات سخت‌شده نسبتا ترد و شکننده‌اند و باید قبل از استفاده بازپخت شوند. در فرایند بازپخت، دما و زمان حرارت‌دادن، به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر بستگی دارد[۱۰-۱۲].

در تمام نمونه‌ها، مراحل تنش‌زدایی و سختکاری و بازپخت مرحله اول یکسان بوده و تنها پارامتر متغیر دمای بازپخت مرحله دوم است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]



شکل ۱ فرایند عملیات حرارتی فولاد AISI D6

شیب حرارتی حاصل از گرم‌کردن در فولاد ابزار پرآلیاژ AISI D6، شیب حرارتی را در حجم قطعه پدید می‌آورد که امکان تشکیل تنش و حتی ترک در قطعه را زیاد می‌کند[۱۱،۱۰]. برای جلوگیری از این رویداد، نمونه‌ها مطابق استاندارد در دو مرحله به صورت زیر پیش‌گرم شده‌اند: مرحله اول به مدت ۱ ساعت در دمای ۳۰۰ تا ۳۵۰ °C و مرحله دوم به مدت ۱ ساعت در دمای ۳۵۰ تا ۵۰۰ °C، تا تعادل حرارتی در نقاط مختلف قطعات به‌وجود آید. میزان انحلال کاربید و در نتیجه درصد کربن و عناصر آلیاژی محلول در آستنیت در دمای سخت‌کردن، بستگی به دما و زمان آستنیته‌کردن دارد[۱۱،۱۰]. در اینجا با استفاده از منابع [۱۳] و [۱۴] این دما و زمان انتخاب شده و همه نمونه‌ها در دمای ۹۶۰ ± ۱۰°C به مدت ۳۰ دقیقه آستنیته شده‌اند. دمای بالای آستنیته موجب کاهش میزان کاربید آلیاژی و افزایش عناصر آلیاژی محلول در زمینه آستنیت و در نهایت افزایش سختی‌پذیری می‌شود[۱۰و۱۱]. از آنجایی که AISI D6 فولادی پرکربن و سختی‌پذیر است، برای کاهش تنش‌های داخلی و افزایش چقرمگی و انعطاف‌پذیری، روش آستمپرینگ[1] برای خنک‌کاری آن استفاده شده است. بدین منظور، پس از آستنیته کامل، نمونه‌ها در حمام نمک ۲۰۰ تا ۲۵۰ °C (دمایی درست قبل از تشکیل مارتنزیت (M_s)) سریع سرد شده تا دگرگونی نقاط مختلف تقریبا همزمان انجام شود و به اندازه‌ای در این دما نگه داشته می‌شود تا دگرگونی آستنیت به بینیت به صورت کامل انجام شود[۱۰-۱۲]. سپس نمونه‌ها در هوا قرار گرفته شده‌اند تا به‌تدریج سرد شده و به درجه حرارت ۶۰ ± ۱۰°C برسند. در صنعت، برای اطمینان از بهبود چقرمگی، نمونه‌ها را در دو مرحله بازپخت می‌کنند. در این تحقیق، در مرحله اول بازپخت همه نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۲۰۰ °C بازپخت شده‌اند. در مرحله دوم بازپخت، نمونه ششم در دمای ۲۲۰ ± ۱۰°C، نمونه پنجم در دمای ۴۵۰ ± ۱۰°C، نمونه چهارم در دمای ۵۴۰ ± ۱۰°C، نمونه سوم در دمای ۵۶۰ ± ۱۰°C و نمونه دوم در دمای ۵۷۰ ± ۱۰°C، همگی به مدت ۱ ساعت بازپخت شده‌اند تا در آن‌ها میکروساختارهای مختلف با دانه‌بندی و سختی متفاوت ایجاد شود. برای عملیات حرارتی همه نمونه‌ها از کوره گازی و حمام نمک خنثی با اسم تجاری GS540R2 (باریم کلراید) استفاده شده است. استفاده از این نوع کوره‌ها بهترین راه برای جلوگیری از تغییر ترکیب شیمیایی فولاد است.

۲-۳- سختی‌سنجی

بعد از اتمام عملیات حرارتی، همه نمونه‌ها با روش ویکرز سختی‌سنجی شده‌اند. در سختی‌سنجی ویکرز قطرهای اثر هرم را به کمک یک میکروسکوپ اندازه گرفته و میانگین آن‌ها را حساب می‌کنیم و با استفاده از فرمول (۱) عدد سختی محاسبه می‌گردد[۱۵و۱۶].

1. Austempering

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]

$$VHN = \frac{1.854\,F}{d^2} \quad (۱)$$

که در آن d قطر متوسط اثر هرم و F نیروی وارد شده است. در این تحقیق سختی‌سنجی با دستگاه والپرت[1] ساخت کشور آلمان و با اعمال نیروی ۵۰ کیلونیوتن انجام شده است. برای هر نمونه سختی، سه نقطه هم‌راستا (دو گوشه و مرکز سطح فوقانی قطعه) اندازه‌گیری شده و متوسط آن‌ها به عنوان سختی معادل درنظر گرفته شده است.

۲-۴- اندازه‌گیری چگالی

سپس چگالی نمونه‌ها با دستگاه بسیار دقیق با رزولوشن ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. اساس اندازه‌گیری این دستگاه بر پایه روش غوطه‌وری ارشمیدس بود که طبق آن در حین انجام آزمایش باید تمام سطح قطعه به طور کامل در آب فرو رود. بعد از محاسبه وزن خشک و وزن در حالت غوطه‌وری قطعه، با استفاده از معادله (۲) چگالی نمونه‌ها محاسبه شد[۱۶].

$$\text{چگالی} = \frac{\text{وزن خشک قطعه}}{\dfrac{(\text{وزن خشک قطعه} - \text{وزن قطعه در غوطه وری})}{\text{چگالی آب}}} \quad (۲)$$

۲-۵- متالوگرافی

برای بررسی و مطالعه ساختمان سطح مقاطع نمونه‌ها و بررسی توزیع فازها، همه نمونه‌ها متالوگرافی شدند. بدین منظور مقطعی از نمونه مورد نظر، که دقیقا خواصی مشابه سایر قسمت‌های نمونه دارد، جدا شد[۱۷]. برای اینکه کمترین تغییر میکروساختاری در سطح مقطع برش‌زده‌شده ایجاد گردد و مقطع برش عمود بر محور قطعه باشد، نمونه‌ها با وایرکات برش زده شدند. بعد از اینکه سطح نمونه کاملا صیقلی و آینه‌ای شد، سطوح نمونه‌ها با محلول نایتال ۴ درصد (۴۸ گرم متانول + ۲ گرم اسید نیتریک) و ۶ درصد (۴۷ گرم متانول + ۳ گرم اسید نیتریک)[۱۳] اچ شدند. در این عمل، مرزدانه‌ها و مناطق پرانرژی فلزات توسط محلول خورده شده و دانه‌بندی نمونه‌ها آشکار می‌شود. فازهای مختلف در مقابل ماده خورنده با شدت‌های متفاوت خورده شده و همین امر موجب تشخیص آن‌ها از یکدیگر خواهد شد. در نهایت، با استفاده از میکروسکوپ نوری، تصویر میکروساختارهای نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی 800x تهیه شده است.

1. Wolpert

۳- سیستم فراصوتی

مطابق شکل ۲، تجهیزات لازم برای انجام آزمون شامل دستگاه فرستنده-گیرنده[2] فراصوتی ساخت شرکت پانامتریکس[3] مدل 5072 PR، کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال ساخت شرکت گیج[4] مدل کامپواسکوپ ۱۴۱۰۰[5] با حداکثر نرخ داده‌برداری ۱۰۰ MHz، پروب‌های فراصوتی غوطه‌وری و عرضی نرمال است.

قسمت اصلی یک سیستم فراصوتی دستگاه فرستنده-گیرنده است که وظیفه ایجاد پالس‌های الکتریکی مناسب برای تحریک پروب‌های فراصوتی را بر عهده دارد. پالس‌های تولیدی به کمک ماده واسط (ماده‌ای که بین پروب و قطعه‌کار قرار می‌گیرد و از مستهلک‌شدن امواج در هوا جلوگیری می‌کند) وارد قطعه‌کار شده و پس از یک رفت‌وبرگشت، توسط پروب دریافت و برای تقویت به بخش گیرنده ارسال می‌شود. سپس سیگنال‌های پیوسته تقویت شده، توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) به سیگنال گسسته، که امکان ذخیره‌سازی و تحلیل آن‌ها آسان‌تر است، تبدیل می‌شوند. با ارسال سیگنال‌ها به واحد پردازش داده‌ها (که معمولاً شامل یک کامپیوتر صنعتی است)، امکان تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف وجود دارد. علاوه بر این، این واحد وظیفه کنترل سایر قسمت‌های سیستم را نیز بر عهده دارد.

در این تحقیق، از روش غوطه‌وری برای اندازه‌گیری سرعت‌های موج طولی و از روش تماسی برای اندازه‌گیری سرعت‌های موج عرضی استفاده شده است. در روش غوطه‌وری ستونی از آب به عنوان ماده واسطه بین پروب و قطعه‌کار قرار گرفته و اثر ناشی از فشار دست بر روی پروب حذف می‌شود. به همین دلیل نتایج حاصل از آن دقیق‌تر بوده و قابلیت تکرارپذیری بالاتری دارد.

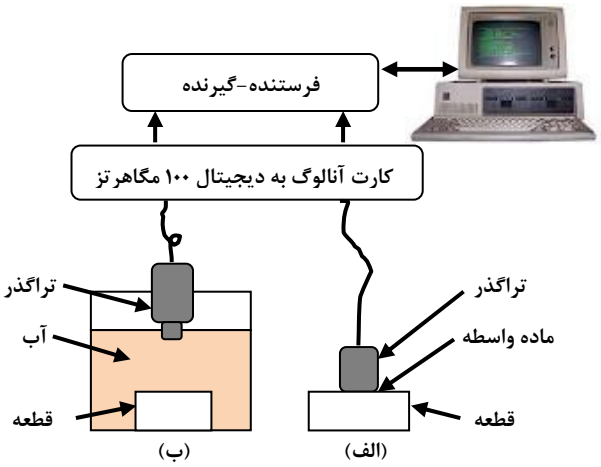
در این روش، از پروب متمرکزکننده[6] ۱۵ MHz برای ارسال و دریافت امواج طولی به داخل قطعه‌کار استفاده شده است. در پروب‌های متمرکزکننده، برای کاهش میزان گستردگی و استهلاک امواج و همچنین ایجاد امواج پرانرژی، از لنزهایی با انحنای مشخص استفاده می‌شود. شکل ۲-ب چیدمان آزمایش‌ها را با روش غوطه‌وری نشان می‌دهد. برای

2. Pulser-receiver
3. Panametrics
4. Gage
5. Compuscope 14100
6. Focus probe

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]

جلوگیری از زنگ‌زدگی محلول خاصی به آب اضافه شده است. مطابق استاندارد ASTM[۱۹،۱۸] در حین انجام آزمایش‌ها ماده واسط (آب به علاوه ماده ضدزنگ) باید تمیز و بدون هر گونه حباب هوا باشد و نباید سطح مورد آزمایش را آلوده کند. لوله جستجو[1] باید طوری بالای قطعه قرار گیرد که امواج فراصوت به صورت عمود به سطح قطعه برخورد کرده و اکوی سطح جلویی قطعه با بیشترین دامنه ظاهر شود.

مطابق شکل ۲-الف، در روش تماسی، برای تولید امواج عرضی، از پروب MHz ۵ و از عسل به عنوان ماده واسط (ماده‌ای با ویسکوزیته بالا) بین پروب و قطعه‌کار استفاده شده است. برای دست‌یافتن به نتایج مطلوب‌تر، در حین انجام آزمایش‌ها، فشار بر روی ماده واسط طوری اعمال شد که سیگنال‌هایی با بیشترین دامنه دریافت شوند و در ادامه این فشار ثابت نگه داشته شد.



شکل ۲ چیدمان آزمایش فراصوتی، (الف) روش تماسی با پروب عرضی نرمال (ب) روش غوطه‌وری با پروب متمرکزکننده

۴- اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی

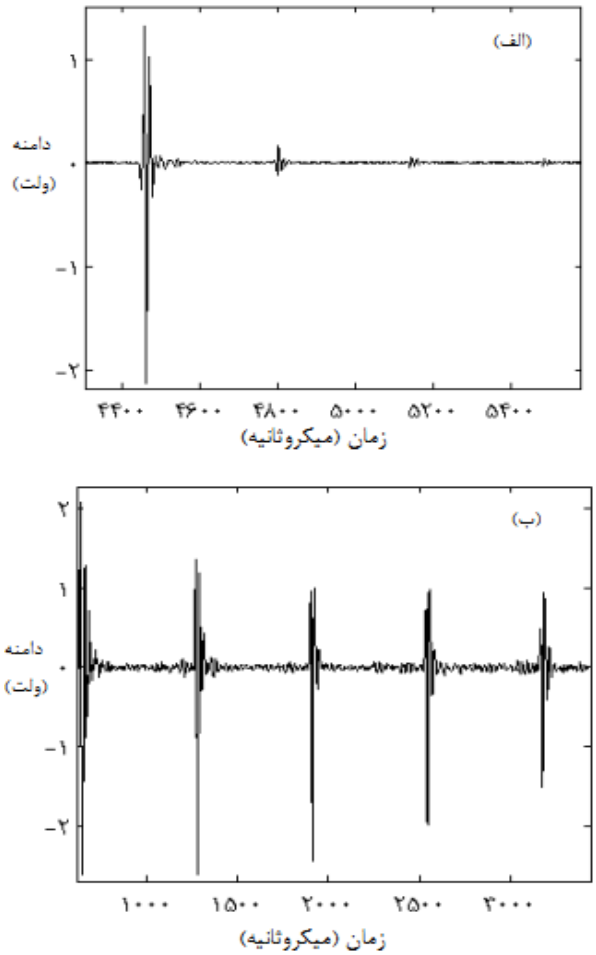
برای اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی از دو روش غوطه‌وری و تماسی استفاده شده است. اساس این دو روش، ارسال موج فراصوتی ایجاد شده در پروب به داخل قطعه و دریافت موج‌های برگشتی از داخل قطعه‌کار است. تفاوت این دو روش در نوع موج فراصوتی ایجادشده (طولی یا عرضی) و نوع ماده واسط است. برای اندازه‌گیری سرعت فراصوت از فرمول (۳) استفاده شده است[۲۰].

1. Search tube

$$V = \frac{kx}{(t_m - t_n)} \qquad (۳)$$

که در آن x فاصله رفت‌وبرگشت موج (دو برابر ضخامت قطعه)، t_m و t_n زمان m امین و n امین موجی است که به صورت رفت‌وبرگشتی داخل قطعه‌کار را می‌پیمایند. k هم برابر اختلاف m و n (شماره اکوها) است.

بعد از اینکه سیگنال برگشتی از داخل قطعه‌کار، توسط کارت آنالوگ به دیجیتال، دریافت و ذخیره‌سازی شد، جهت انجام محاسبات دقیق‌تر سیگنال به محیط نرم‌افزار متلب برده شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافتی از قطعه‌کار را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه طول موج امواج فراصوتی عرضی کوتاه‌تر است، این موج حساسیت بیشتری به تغییرات میکروساختارها داشته و برای تشخیص اختلافات جزئی آن‌ها مناسب‌تر است[۲۲،۲۱].



شکل ۳ نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافتی از قطعه‌کار، (الف) موج طولی (ب) موج عرضی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]

برای به‌دست آوردن دقیق سرعت فراصوت، از تکنیک کراس کورولوشن[1] استفاده شده است. تابع تعریفی این تکنیک برای دو سیگنال $x(t)$ و $y(t)$ مطابق معادله ۴ تعریف می‌شود[۳].

$$R_{xy}(t) = lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T x(\tau)y(t+\tau)d(\tau) \qquad (۴)$$

که در آن t شاخص زمان سیگنال‌های x و y و τ تاخیر زمانی سیگنال‌های مورد استفاده است.

برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، هر یک از آزمایش‌ها حداقل ۳ تا ۵ بار انجام شده و نهایتا میانگین نتایج به‌دست آمده است. نتایج به‌دست آمده از انجام آزمایش‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲ خواص فراصوتی نمونه‌های فولاد AISI D6

شماره نمونه	چگالی (kg/m^3)	سرعت طولی (m/s)	سرعت عرضی (m/s)	نسبت سرعت‌ها
۱	۷۱۳۷/۴	۶۱۷۵/۷	۳۳۰۳/۱	۱/۸۷
۲	۷۰۹۶/۳	۶۱۷۳/۷	۳۲۹۵/۹	۱/۸۷
۳	۷۰۷۸/۹	۶۱۴۶/۷	۳۲۹۵/۳	۱/۸۷
۴	۷۱۱۹/۵	۶۱۴۵/۶	۳۲۹۰/۱	۱/۸۷
۵	۷۱۶۸/۲	۶۰۸۶/۱	۳۲۵۵/۵	۱/۸۷
۶	۷۱۰۶/۵	۶۰۷۲/۴	۳۲۳۷/۳	۱/۸۸

۵- تحلیل نتایج

خواص الاستیکی فلزات بر اساس نیروهای بین اتمی تمام اتم‌های فلزات تخمین زده می‌شود. بنابراین کوچک‌ترین انحلال اتم‌ها یا تغییر موقعیت آن‌ها به وسیله عملیات حرارتی، بر روی مقدار خواص الاستیکی آن‌ها، اثر خواهد گذاشت. با دانستن سرعت طولی و عرضی امواج فراصوتی، می‌توان خواص مکانیکی میکروساختارها را مطابق معادلات (۵) تا (۸) به‌دست آورد [۲۳،۲۰]. این در حالی است که در روش‌های معمولی، به دلیل اختلاف بسیار جزیی این خواص، معمولا نمی‌توان تمایزی بین خواص میکروساختارها به صورت دقیق مشاهده کرد.

$$\sigma = \frac{1-2(\frac{V_s}{V_l})^2}{2(1-(\frac{V_s}{V_l})^2)} \qquad (۵)$$

$$E = \frac{\rho V_s^2(3V_l^2 - 4V_s^2)}{V_l^2 - V_s^2} \qquad (۶)$$

1. Cross-Correlation

$$G = \rho V_s^2 \qquad (۷)$$

$$K = \rho(V_l^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \qquad (۸)$$

که در آن‌ها ρ چگالی (kg/m^3)، V_l سرعت طولی (m/s)، V_s سرعت عرضی (m/s)، σ نسبت پواسون، E مدول الاستیسیته (Gpa)، G مدول برشی (Gpa) و K مدول حجمی (Gpa) است. چگالی و خواص فراصوتی نمونه‌های بازپخت شده در جدول ۲ و خواص مکانیکی آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳ خواص مکانیکی نمونه‌های فولاد AISI D6

شماره نمونه	سختی ویکرز	مدول یانگ (GPa)	مدول برشی (GPa)	مدول حجمی (GPa)	نسبت پواسون
۱	۲۵۱/۸	۲۰۲/۴۱	۷۷/۸۷	۱۶۸/۳۹	۰/۳۰۰
۲	۵۰۵/۵	۲۰۰/۵۴	۷۷/۰۹	۱۶۷/۶۸	۰/۳۰۱
۳	۵۲۶/۶	۱۹۹/۶۱	۷۶/۸۷	۱۶۴/۹۶	۰/۲۹۸
۴	۵۶۹/۸	۲۰۰/۲۴	۷۷/۰۷	۱۶۶/۱۳	۰/۲۹۹
۵	۶۹۵/۸	۱۹۷/۴۶	۷۵/۹۷	۱۶۴/۲۱	۰/۳۰۰
۶	۷۳۶/۴	۱۹۳/۸۶	۷۴/۴۸	۱۶۲/۷۴	۰/۳۰۱

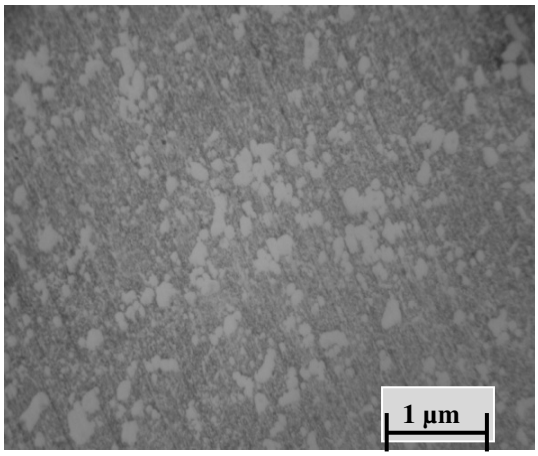
شکل ۴ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های AISI D6 را نشان می‌دهد. با مقایسه نمونه‌های ۲ تا ۶، مشاهده می‌شود که با افزایش دمای بازپخت، تعداد نواحی سفیدرنگ، که کاربیدهای آلیاژی و سمنتیت هستند، افزایش یافته و تمایل آن‌ها به کروی‌شکل شدن بیشتر می‌شود.

مقایسه نمونه بدون عملیات حرارتی و نمونه‌های بازپختی، تفاوت پس‌زمینه آن‌ها را نشان می‌دهد. این زمینه قهوه‌ای‌رنگ در نمونه‌های بازپختی مارتنزیت بازپخت شده است که با افزایش دمای بازپخت درصد آن‌ها نیز بیشتر می‌شود. درصد بالای عناصر آلیاژی، به‌ویژه کرم، باعث شده که کاربیدهای این عناصر از همان ابتدا به صورت لکه‌های نسبتا بزرگ ظاهر شوند. با افزایش دمای بازپخت، نوع کاربیدها نیز تغییر می‌کند، که اثر مستقیم بر روی سختی و چگالی نمونه‌ها دارد. در ادامه ترتیب شکل‌گیری و ویژگی این کاربیدها شرح داده خواهد شد.

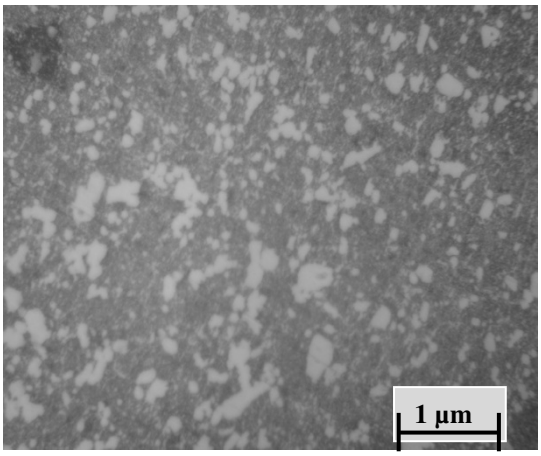
شکل ۵ روند تغییر سختی نمونه‌ها را با تغییر دمای بازپخت نشان می‌دهد. با کاهش دمای بازپخت، سختی افزایش می‌یابد و سختی تمام نمونه‌های بازپخت شده نیز از نمونه اولیه بیشتر است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

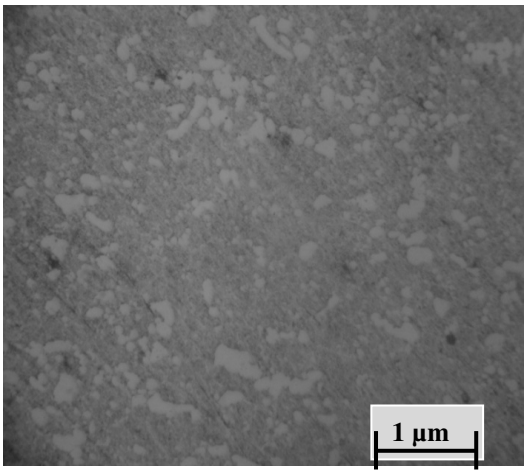
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]



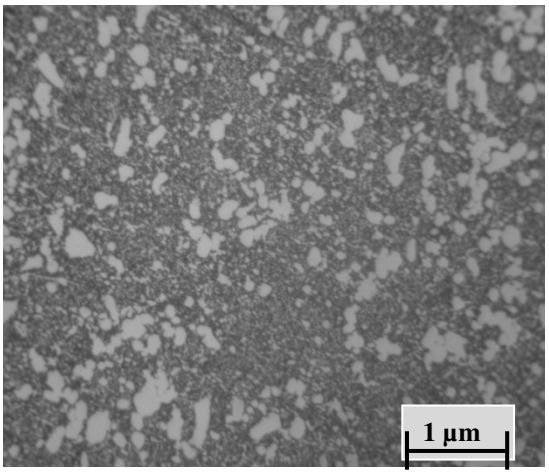
نمونه دوم (بازپخت در ۵۷۰ °C)



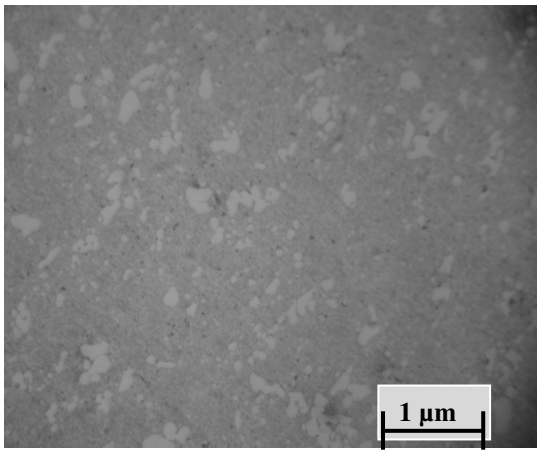
نمونه اول (بدون بازپخت)



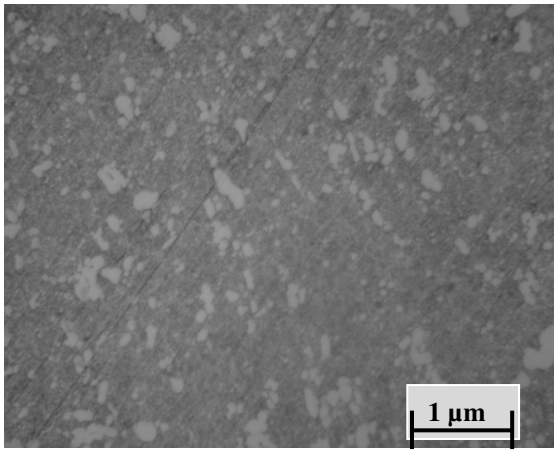
نمونه چهارم (بازپخت در ۵۴۰ °C)



نمونه سوم (بازپخت در ۵۶۰ °C)



نمونه ششم (بازپخت در ۲۲۰ °C)

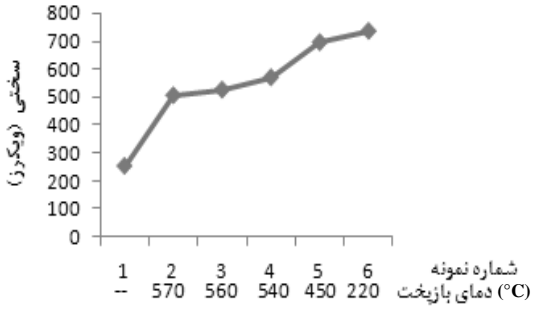


نمونه پنجم (بازپخت در ۴۵۰ °C)

شکل ۴ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های AISI D6 با بزرگ‌نمایی 800x

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]



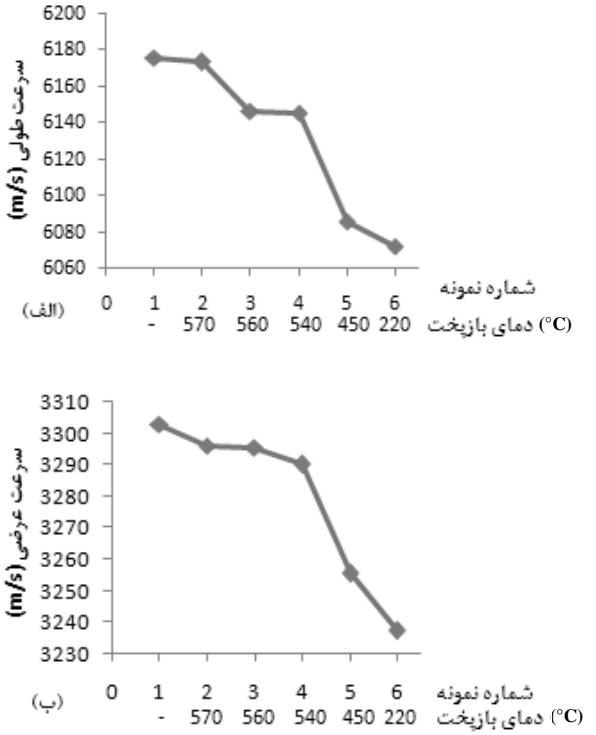
شکل ۵ تاثیر دمای بازپخت بر روی سختی نمونه‌ها

علت افزایش سختی در مرحله بازپخت تبدیل آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت و ایجاد کاربیدهای آلیاژی است. در فرایند بازپخت، با افزایش دما، مارتنزیت به میکروساختارهای دیگری تبدیل می‌شود که ترتیب تشکیل آن‌ها کاربید اپسیلن[1]، کاربید اتا[2]، سمنتیت، Cr_7C_3 و نهایتا $Cr_{23}C_6$ می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که سختی کاربیدهای تشکیل‌شده نیز با همان ترتیب کاهش می‌یابد؛ یعنی سختی $Cr_{23}C_6$ نسبت به سایر کاربیدها کمتر است[۱۱،۱۰].

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، نحوه تغییرات سرعت‌های طولی و عرضی امواج فراصوتی روند مشابهی دارند و با افزایش دمای بازپخت و کاهش سختی میکروساختارها، مقدار سرعت‌ها افزایش می‌یابد.

نمودارها نشان می‌دهند که سرعت نمونه بدون عملیات حرارتی از همه نمونه‌های بازپخت‌شده بیشتر است و انجام عملیات‌های سختکاری و بازپخت سرعت‌های فراصوتی را کلا کاهش می‌دهد. نسبت سرعت طولی به عرضی تقریبا ثابت و برابر ۱/۸۷ می‌باشد؛ پس با دانستن یکی از سرعت‌ها می‌توان سرعت دیگر را با دقت مناسبی تخمین زد. ساختار نمونه‌ها قبل از بازپخت اکثرا مارتنزیتی و پس از اتمام بازپخت ساختاری با زمینه یکنواخت فریتِ هم‌محور است. یعنی درحین بازپخت امکان میکروساختارهای سمنتیت و بینیت نیز وجود دارد.

تحقیقات نشان داده است، با تشکیل میکروساختارهای فریت، پرلیت درشت، پرلیت ریز، سمنتیت، بینیت و مارتنزیت در فولادها (فولادهای متوسط کربن کم‌آلیاژ، AISI 4140 و 38 NiCr Mo4 [۹،۵،۸])، به‌ترتیب سختی آن‌ها افزایش و سرعت امواج فراصوتی در آن‌ها کاهش می‌یابد. با مشاهده همین روند تغییرات در نمونه‌های بازپختی AISI D6 می‌توان، علاوه بر تایید آزمایش‌ها، این نتیجه را نیز بسط داد. مقایسه خواص به‌دست آمده برای میکروساختارها در این تحقیق با خواص میکروساختارهای مشابه در منابع معتبر [۲۵،۱۴،۲۴،۱۳] صحت نتایج به‌دست آمده را تایید می‌کند.



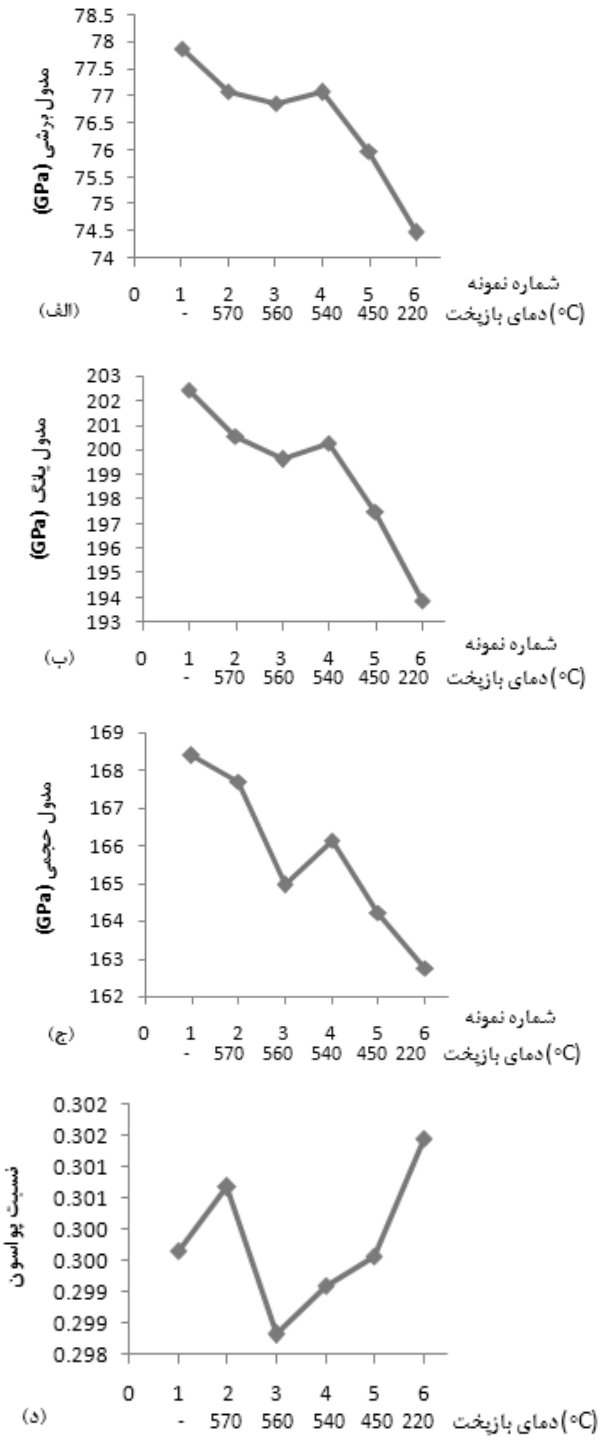
شکل ۶ خواص فراصوتی نمونه‌های فولاد AISI D6، (الف) سرعت طولی (ب) سرعت عرضی

نمودار روند تغییرات خواص مکانیکی در شکل ۷ نشان داده شده است. از روی نتایج جدول ۳ و نمودارهای شکل ۷، می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییر مدول یانگ، مدول برشی و مدول حجمی با روند تغییر سرعت‌های امواج طولی و عرضی آن‌ها یکسان است و در بین نمونه‌های فولاد AISI D6، نمونه اول بالاترین و نمونه ششم پایین‌ترین مقدار خواص مکانیکی را دارند.

نحوه تغییر چگالی در شکل ۸ نشان داده شده است. AISI D6 فولادی است با تغییر ابعادی بسیار کم[۱۳] و به همین دلیل است که درصد تغییرات چگالی آن کم است، ولی با این وجود در حین فرایند بازپخت تغییراتی صورت می‌گیرد که باعث تغییر جزیی میکروساختارها و خواص مکانیکی و فراصوتی نمونه‌ها می‌شود.

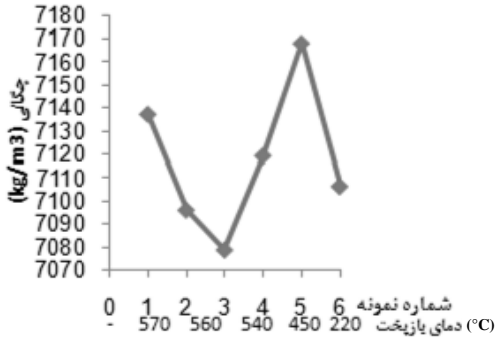
1. ε -carbiide
2. Eta carbide

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]



شکل ۷ تاثیر دمای بازپخت بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های فولاد AISI D6: (الف) مدول برشی (ب) مدول یانگ (ج) مدول حجمی (د) نسبت پواسون

تا قبل از دمای ۲۰۰ °C کاربیدهای انتقالی نظیر کاربید اپسیلن (ε) و یا کاربید اتا (η) تشکیل می‌شود. این کاربیدها به صورت ذرات بسیار ریز در ساختار مارتنزیت و در تمامی نقاط آن، نظیر داخل صفحات مارتنزیتی و در فصل مشترک‌های آن‌ها، تشکیل می‌شود.



شکل ۸ تاثیر دمای بازپخت بر روی چگالی نمونه‌ها

با تشکیل کاربیدهای انتقالی، درصد کربن مارتنزیت کم شده و شبکه بلوری نامتعادل bct مارتنزیت به ساختار بلوری bcc فریت تبدیل می‌شود. در ادامه، با بالا رفتن دمای بازپخت، صفحات فریتی رشد کرده و زمینه یکنواخت فریت هم‌محور به‌وجود می‌آید. در ۲۰۰ تا ۳۰۰ °C، آستنیت باقی‌مانده تجزیه و تبدیل به مخلوط فریت و سمنتیت می‌شود. تجزیه آستنیت باقی‌مانده ضمن بازپخت مطابق نمودار IT شده و منجر به افزایش ابعاد قطعه می‌شود. در ۲۵۰-۳۵۰ °C کاربیدهای انتقالی و مارتنزیت کم‌کربن توسط فریت و سمنتیت جایگزین می‌شوند. با افزایش دمای بازپخت، سمنتیت با ساختار بلوری اورتورومبیک به Cr_7C_3 با ساختار بلوری شش وجهی تبدیل شده و با ادامه افزایش دمای بازپخت، $Cr_{23}C_6$ با ساختار مکعبی تشکیل می‌شود. تشکیل این کاربیدها منجر به ایجاد تنش در ساختار، افزایش حجم و کاهش چگالی می‌شود. همراه با رسوب کاربیدهای آلیاژی، درصد کربن و عناصر آلیاژی زمینه کاهش می‌یابد و بنابراین دمای M_s آستنیت باقی‌مانده که هنوز تجزیه نشده است، افزایش خواهد یافت.

در فولاد AISI D6 که حاوی کربن زیاد و عناصر کاربیدساز (به ویژه کرم) است، به دلیل پایین بودن M_s و M_f ، دگرگونی تبدیل آستنیت به مارتنزیت معمولا به صورت کامل انجام نشده و مقداری آستنیت ناپایدار در سیستم می‌ماند. در ضمن سرد کردن از دمای بازپخت، آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت تبدیل می‌شود و در نتیجه باعث افزایش حجم می‌شود. ساختار

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]

آستنیت با شبکه بلوری fcc نسبت به تمامی محصولات حاصل از تجزیه آن فشرده‌تر است. بنابراین، هنگامی‌که آستنیت به فریت، پرلیت، بینیت، مارتنزیت و یا مخلوطی از آن‌ها تبدیل می‌شود، حجم افزایش خواهد یافت.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، با اندازه‌گیری سرعت طولی و عرضی امواج فراصوتی در فولاد AISI D6، خواص مکانیکی این فولاد، با دقت بسیار بالایی، به‌دست آمد. مزیت استفاده از این روش نسبت به روش‌های مورد استفاده پیشین غیرمخرب بودن، سریع‌تر و دقیق‌تر بودن آن است. روند تغییرات سختی، سرعت امواج طولی و عرضی، مدول‌های یانگ، برشی و حجمی با تغییر دمای بازپخت مشخص و منظم است و با کاهش دمای بازپخت سختی نمونه‌ها افزایش و خواص مکانیکی و فراصوتی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. با دانستن این روند، می‌توان برای رسیدن به خواص مکانیکی مورد نظر، به‌راحتی دمای بازپخت نمونه را تخمین زد. این امر موجب صرفه‌جویی در هزینه و زمان خواهد شد. با دقت در نتایج به‌دست آمده از روش‌های غیرمخرب فراصوتی، می‌توان مشاهده کرد که اختلاف بین خواص مکانیکی برخی از نمونه‌ها به قدری ناچیز است که با روش‌های مخرب مرسوم به هیچ وجه نمی‌توان آن‌ها را تشخیص داد.

۷- مراجع

[۱] الوک نایار، *راهنمای جامع فولاد*، ترجمه حسن غیاثوند، حجت اله عالی، محمدرضا رهگذر، تهران، جهان جام‌جم، ۱۳۸۴.

[2] Vasudevan M., Palanichamy P., "Characterization of Mmicrostructural Changes During Annealing of Cold Worked Austenitic Stainless Steel using Ultrasonic Velocity Measurements and Correlation with Mechanical Properties," *Materials Engineering and Performance*, Vol. 11, 2002, pp. 169-179.

[3] Kumar A., Jayakumar T., Raj B., Ray K., "Characterization of Solutionizing Behavior in VT14Titanium Alloy using Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurements," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 360, 2003, pp. 58-64.

[4] Rajendran V., Palanivelu N., Chaudhuri B. K., "A Device for the Measurement of Ultrasonic Velocity and Attenuation in Solid Materials Under Different Thermal Conditions", *Measurement*, Vol. 38, 2005. pp. 248-25.

[5] Murthy G. V. S., Sridhar G., Kumar A., Jayakumar T., "Characterization of Intermetallic Precipitates in a Nimonic Alloy by Ultrasonic Velocity Measurements", *Materials Characterization*, Vol. 60, 2009, pp. 234-239.

[6] Carreon H., Ruiz A., Medina A., Barrera G., Zarate J., "Characterization of the Alumina-Zirconia Ceramic System by Ultrasonic Velocity Measurements", *Materials Characterization*, Vol. 60, 2009, pp. 875-881.

[7] Zawrah M. F., El-Gazery M., "Mechanical Properties of SiC Ceramics by Ultrasonic Nondestructive Technique and its Bioactivity", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 106, 2007, pp. 330-337.

[8] Moro A., Farina C., Rossi F., "Measurement of Ultrasonic Wave Velocity in Steel for Various Structures and Degrees of Cold-Working", *NDT International*, Vol. 13, 1980, pp. 169-175.

[9] Gur C. H., Tuncer B. O., "Characterization of Microstructural Phases of Steels by Sound Velocity Measurement", *Materials Characterization*, Vol. 55, 2005, pp. 160- 166.

[10] Krauss, G., *Steels: Heat Treatment and Processing Principl*es, Ohio, ASM International, 1993.

[۱۱] گلعذار محمدعلی، *اصول کاربرد عملیات حرارتی فولادها*، مرکز نشر اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۹.

[۱۲] ویلیام اسمیت، *ساختار، خواص و کاربرد آلیاژهای مهندسی*، ترجمه علی اکبر اکرامی، مرتضی سید ریحانی، دانشگاه صنعتی شریف تهران، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۸۰.

[13] Harry C., *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*, Ohio, ASM International, 1990.

[14] ASM Handbook, Vol. 4, *Heat Treating*, Ohio, ASM International, 1991.

[15] ASTM Standard E 92-82 (Reapproved 2003), *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*.

[16] Nishara Begum A., Rajendran V., Jayakumar T., Palanichamy P., Priyadharsini N., Aravindan S., Raj B., "On-Line Ultrasonic Velocity Measurements for Characterisation of Microstructural Evaluation during Thermal Aging of β-Quenched Zircaloy-2, *Materials Characterization*, Vol. 58, 2007, pp. 563-570.

[۱۷] خاکزاد امیر، *متالوگرافی، مفاهیم و آزمایشگاه*، تهران، طراح، ۱۳۸۷.

[18] ASTM Standard, Designation:E 214, Standard Practice for Immersed Ultrasonic Examination by the Reflection Method Using Pulsed Longitudinal Waves.

[19] ASTM Standard, Designation: E 1001, Standard Practice for Detection and Evaluation of Discontinuities by the Immersed Pulse-Echo

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]

Ultrasonic Method Using Longitudinal Waves.
[20] ASTM Standard, Designation: E 797-95 Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method.
[21] Palani chamy P., Joseph A., Jayakumar T., Raj B., "Ultrasonic Velocity Measurements for Estimation of Grain Size in Austenitic Stainless Steel", *NDT&E International*, Vol. 28, 1995, pp. 179-185.
[22] Murthy G. V. S., Sridhar G., Kumar A., Jayakum T., "Characterization of Intermetallic Precipitates in a Nimonic Alloy by Ultrasonic Velocity Measurements", *Materials Characterization*, Vol. 60, 2009, pp. 234-239.
[23] Brandes E. A., Brook G. B., *Smithells Metals Reference Book*, Seventh Edition, Oxford, Butterworth-Heinemann, 1998.
[24] Prabhudev K. H., *Handbook of Heat Treatment of Steels*, 8th Reprint, New York, Tata McGraw-Hill, 2003.
[25] www.matweb.com.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.4.5.6]