

استفاده از روش غیرمخرب فراصوتی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی فولاد AISI 4140

محمد حمیدنیا^۱، فرهنگ هنرور^{۲*}

* نویسنده مسئول: honarvar@kntu.ac.ir

واژه‌های کلیدی

خواص مکانیکی فولاد، روش غیر مخرب فراصوتی، فولاد AISI ۴۱۴۰، تحلیل عدم قطعیت.

چکیده

دست‌یافتن به خواص مکانیکی فولادها پس از پروسه‌های مختلف ساخت و عملیات حرارتی، امری ضروری و مهم است. در صنایع گوناگون معمولاً بعد از نمونه‌سازیهایی مشخص و استاندارد، به کمک روشهای مخرب این خواص را به دست می‌آورند که این امر باعث اتلاف هزینه و زمان زیادی می‌شود. علاوه بر این، روشهای مخرب قادر به تشخیص تغییرات جزئی خواص مکانیکی در حین عملیات حرارتی نیستند. در این مقاله، برای به دست آوردن خواص مکانیکی فولاد AISI ۴۱۴۰ با دقت بالا از روش غیرمخرب فراصوتی استفاده شده است. برای این منظور، 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، مدول برشی، ضریب پواسون و مدول حجمی در این میکروساختارها، سرعت موج طولی و عرضی توسط آزمون فراصوتی اندازه‌گیری شده است. برای شناسایی عوامل خطا و تعیین دقت روش اندازه‌گیری مورد استفاده، تحلیل عدم قطعیت نیز صورت گرفته است. مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایشها با داده‌های موجود در مراجع مختلف نشان می‌دهد با روش غیرمخرب فراصوتی می‌توان خواص مکانیکی نمونه‌های AISI ۴۱۴۰ را با دقت بسیار بالایی به دست آورد. محاسبه خواص مکانیکی نمونه‌های مختلف فولاد AISI ۴۱۴۰ می‌دهند که این خواص در سخت‌ترین ساختار بیشترین مقدار و با کاهش سختی، این خواص نیز کاهش می‌یابند.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۱- مقدمه

فولاد AISI 4140 به دلیل ترکیب شیمیایی موجود، برای سختکاری مناسب است و پس از بازپخت در استحکام کششی مورد نظر، چقرمگی خوبی دارد و به همین دلیل به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف استفاده می‌شود [۱]. یافتن خواص مکانیکی میکروساختارهای مختلفی که در فرایندهای مختلف سختکاری در این فولاد به وجود می‌آید، بسیار مفید و کاربردی است. معمولاً با روش‌های غیردقیق و مخرب این ویژگی‌ها تخمین زده می‌شود [۲].

به طور کلی در آزمون‌های فراصوتی با دانستن خواص آکوستیکی می‌توان به طور دقیق و قابل اطمینان خواص مکانیکی اکثر مواد مهندسی از جمله فلزات، پلاستیک‌ها، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها، اپوکسی‌ها و شیشه‌ها را با دقت بسیار بالا به دست آورد [۳].

در سالیان اخیر مطالعات مختلفی برای تخمین خواص مکانیکی مواد مختلف با روش غیر مخرب فراصوتی صورت گرفته است. زمانی که در یک قطعه میکروساختارهای گوناگونی وجود داشته باشند، امواج فراصوتی طولی و عرضی هنگام عبور از هر یک از این میکروساختارها سرعت متفاوتی خواهند داشت. با تعیین این اختلاف جزئی، می‌توان به اختلاف بسیار ناچیز خواص مکانیکی میکروساختارها پی برد.

راجندران [۴]، برای به دست 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 و زاوراه [۷]، برای به دست آوردن خواص مکانیکی سرامیک کاربید سیلیکون در دماهای بالا از روش آزمون اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت استفاده کرده‌اند. همین‌طور مورو [۸]، برای بررسی خواص فازهای مختلف در فولادهای 304L و 316L و گور [۹]، برای شناسایی خواص میکروساختارهای مختلف فولادهای AISI 4140 و AISI 5140 همین روش را به کار برند.

در این مقاله 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 در میکروساختارهای مارتنزیتی و پرلیتی فولاد AISI 4140، خواص مکانیکی این میکروساختارها تخمین زده شده است. برای نشان دادن دقت روش غیرمخرب مورد استفاده، تحلیل عدم قطعیت این روش نیز ارائه خواهد شد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق فولاد AISI 4140 با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول (۱) به دلیل کاربردهای زیاد صنعتی، جهت بررسی و مطالعه انتخاب شده است. در این فولاد، به دلیل ترکیب شیمیایی خاصی که دارد، می‌توان با تغییر فرایند سختکاری و بازپخت، میکروساختارهای مختلفی را شده است.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی فولاد AISI ۴۱۴۰ [۱].

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Co
۰/۴۲	۰/۲	۰/۷۵	۱	۰/۲۵	-	-	-

برای ایجاد میکروساختارهای مختلف در فولاد AISI 4140، پنج نمونه استوانه‌ای شکل با قطر (mm) ۲۸ و ارتفاع (mm) ۵۰، به گونه‌ای ماشینکاری شده‌اند که سطح نمونه‌ها کاملاً موازی و صاف باشند. سپس نمونه مکعبی شکل تحت سختکاری القایی با فرکانس بالا، به گونه‌ای سختکاری شد که در تمام حجم آن میکروساختار مارتنزیتی تشکیل شد.

نمونه‌ها را مطابق استاندارد در دو مرحله به صورت ذیل پیش‌گرم کرده‌اند: مرحله اول به مدت ۱ ساعت در دمای ۳۵۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد و مرحله دوم به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۰۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد، تا از ایجاد تنش‌های پسماند، شوک حرارتی و اعوجاج در قطعات جلوگیری شود. سپس همه نمونه‌ها در دمای ۱۰-۸۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه

که در آن d قطر متوسط اثر هرم و F نیروی وارد شده است. در این تحقیق سختی سنجی با دستگاه WOLPERT ساخت کشور آلمان و با اعمال نیروی ۵۰ کیلو نیوتن 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 در نظر گرفته شده است. نتایج تست در جدول (۲) آمده است.

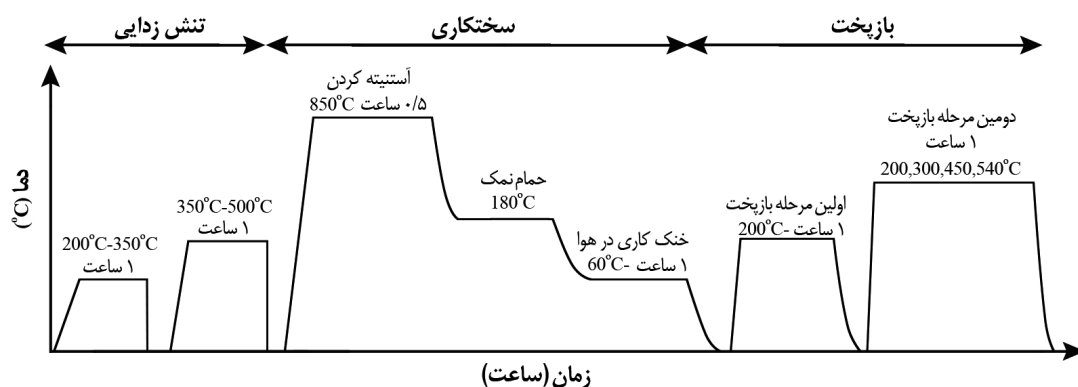
سپس چگالی نمونه‌ها، با دستگاه بسیار دقیق با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. اساس اندازه‌گیری این دستگاه بر پایه روش غوطه‌وری ارشمیدس بود که طبق آن در حین انجام آزمایش باید تمام سطح قطعه به طور کامل در آب فرو رود. بعد از محاسبه وزن خشک و وزن در حالت غوطه‌وری قطعه، با استفاده از رابطه (۲) چگالی نمونه‌ها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

$$\text{چگالی} = \frac{\text{وزن خشک قطعه}}{\text{وزن خشک قطعه} - \text{وزن قطعه در غوطه‌وری}} \quad (2)$$

آستینیت شده و در دمای ۱۰-۱۸۰ در حمام نمک کوئنچ شده‌اند و نهایتاً در هوا قرار گرفته‌اند تا به تدریج سرد شده و به درجه حرارت ۱۰-۶۰ درجه سانتیگراد برسند. بر روی تمام نمونه‌ها تمام مراحل فوق انجام گرفته و تنها تفاوت آنها در مدت زمان بازپخت آنهاست. نمونه اول در دمای ۱۰-۲۰۰ به مدت ۱ ساعت، نمونه دوم در دمای ۱۰-۲۰۰ در دو مرحله جداگانه ۱ ساعتی، نمونه سوم در دمای ۱۰-۳۰۰ به مدت ۱ ساعت، نمونه چهارم در دمای ۱۰-۴۵۰ به مدت ۱ ساعت و نمونه پنجم در دمای ۱۰-۵۴۰ به مدت ۱ ساعت بازپخت شده‌اند تا در آنها میکروساختارهای مختلف با دانه‌بندی و سختی متفاوت ایجاد شود. شکل شماتیک فرایند عملیات حرارتی در شکل (۱) نشان داده شده است.

سپس 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 کرده و با استفاده از رابطه (۱) عدد سختی محاسبه می‌شود.

$$VHN = \frac{1/185 F}{d^2} \quad (1)$$



شکل (۱) فرایند عملیات حرارتی فولاد AISI ۴۱۴۰.

۳- سیستم فراصوتی

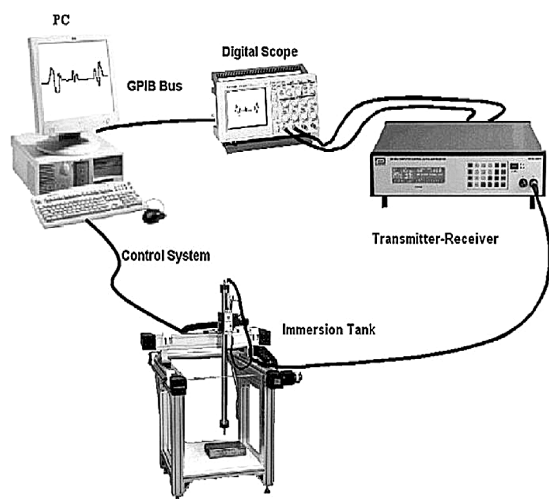
قسمت اصلی یک سیستم فراصوتی، دستگاه Pulsar-receiver است که وظیفه ایجاد پالس‌های الکتریکی مناسب برای تحریک پروب‌های فراصوتی را بر عهده دارد. پالس‌های تولیدی به کمک ماده واسط (ماده‌ای که بین پروب و قطعه کار قرار می‌گیرد و از مستهلک شدن امواج در هوا جلوگیری می‌کند) وارد قطعه کار شده و پس از یک رفت و برگشت، توسط پروب دریافت می‌شود و برای تقویت به بخش receiver ارسال می‌شود. سپس سیگنال‌های پیوسته تقویت‌شده 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. همچنین 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 قطعه کار 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 متمرکز کننده^۱ ۱۵ MHz برای ارسال و دریافت امواج فراصوتی به داخل قطعه کار استفاده شده است. در پروب‌های متمرکز کننده، برای کاهش میزان گسترده‌گی و استهلاک امواج و همچنین ایجاد امواج پراانرژی، از لنزهایی با انحنای مشخص استفاده می‌شود. شکل (۲) چیدمان آزمایشات را با روش غوطه‌وری نشان می‌دهد. برای جلوگیری از زنگ‌زدگی محلول خاصی به آب اضافه شده است. مطابق استاندارد ASTM [۱۰-۱۱] در حین انجام آزمایش‌های ماده

واسط (آب بعلاوه ماده ضدزنگ) باید تمیز و بدون هر گونه حباب هوا باشد و نباید سطح مورد آزمایش را آلوده کند. لوله جستجو^۲ باید طوری بالای قطعه قرار گیرد که امواج فراصوت به‌صورت عمود به سطح قطعه برخورد کرده و اکوی سطح جلویی قطعه با بیشترین دامنه، ظاهر شود.

در روش تماسی برای تولید امواج عرضی از پروب ۵ MHz و از عسل (ماده واسطی با ویسکوزیته بالا) به عنوان ماده واسطه بین پروب و قطعه کار استفاده شده است. برای دست یافتن به نتایج مطلوب‌تر، در حین انجام آزمایش‌های فشار بر روی ماده واسطه طوری اعمال شد که سیگنال‌هایی با بیشترین دامنه دریافت شوند و در ادامه این فشار ثابت نگهداشته شد.



شکل (۲) چیدمان آزمایش فراصوتی.

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 قطعه کار است. تفاوت این دو روش در نوع موج فراصوتی ایجاد شده (طولی یا عرضی) و نوع ماده واسطه است. برای اندازه‌گیری سرعت

فراصوت مطابق استاندارد [۳]، از رابطه $V = \frac{kx}{(t_m - t_n)}$

2- Search tube

1- Focus probe

بازپخت مرحله دوم، میکروساختار نمونه‌ها تغییر کرده است. با در نظر گرفتن این شرایط می‌توان نتیجه گرفت که تنها عامل متفاوت بین نمونه‌ها، میکروساختارهای ناشی از دمای بازپخت مرحله دوم است.

با فرض اینکه رابط محاسبه سرعت طولی موج فراصوت $V = \frac{x}{t}$ و معادله کاهش به صورت $V = f(x, t)$ باشد، عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت فراصوت (W_V) را با فرض سطح اطمینان ۹۵٪ و توزیع استیودنت^۲ از معادله (۳) به دست می‌آید که در آن U_x عدم قطعیت متغیر x و U_t عدم قطعیت متغیر t است. برای هر یک از متغیرهای مستقل معادله کاهش (x و t) که از اندازه‌گیریهای مستقل به دست می‌آیند، یک خطای اتفاقی P_j و یک خطای سیستماتیک B_j وجود دارد.

$$W_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x} \times U_x\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial t} \times U_t\right)^2} \quad (3)$$

با توجه به اینکه در اندازه‌گیریهای صورت گرفته، $U_x = 0.1 \text{ mm}$ و $U_t = 0.6 \mu\text{s}$ می‌باشند، مقدار عدم قطعیت $\left(\frac{W_V}{V}\right)$ عدد بسیار کوچکی خواهد شد و مفهوم آن این است که با قطعیت و دقت بسیار بالایی می‌توان مقدار سرعت‌های به دست آمده از این روش اندازه‌گیری را پذیرفت. در تمام محاسبات انجام شده، مقدار $\frac{\partial V}{\partial x}$ بزرگتر از $\frac{\partial V}{\partial t}$ است و این بدین مفهوم است که کمیت $\frac{\partial V}{\partial x}$ نسبت به $\frac{\partial V}{\partial t}$ اثر بیشتری بر روی اندازه‌گیری سرعت دارد [۱۳-۱۵]. علاوه بر متغیرهای مستقل x و t که مستقیماً در معادله کاهش ظاهر می‌شوند، پارامترهایی نیز وجود دارند که در اندازه‌گیری مؤثرند ولی در معادله کاهش ظاهر نمی‌شوند (مانند سرعت اسکن کردن، میزان ذرات موجود در ماده واسط، کابل‌های واسط، ضخامت لایه ماده واسطه و میزان فشار اعمالی بر روی آن و ...). این پارامترها بیشتر در حین انجام آزمایشها باید اعمال شوند. با استفاده از منابع [۱۵-۱۸] اثر این پارامترها در حین انجام آزمایشها در نظر گرفته شد.

استفاده شده است که در آن x فاصله رفت و برگشت موج (دو برابر ضخامت قطعه)، t_m و t_n زمان m امین و n امین موجی است که به صورت رفت و برگشتی داخل قطعه کار را می‌پیمایند. k برابر اختلاف m و n (شماره اکوها) است.

بعد از اینکه سیگنال برگشتی از داخل قطعه کار توسط کارت آنالوگ به دیجیتال دریافت و ذخیره‌سازی شد، برای انجام محاسبات دقیق‌تر سیگنال به محیط نرم‌افزار MATLAB برده شده و برای به دست آوردن دقیق‌تر سرعت فراصوت، از تکنیک Cross-Correlation استفاده شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، هر یک از آزمایشات حداقل ۳ تا ۵ بار انجام شده و نهایتاً میانگین نتایج به دست آمده است. نتایج به دست آمده از انجام آزمایشها در جدول (۲) خلاصه شده است.

۵- تحلیل عدم قطعیت در مورد اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی

تقریباً تمام آزمایشهایی که انجام می‌شود، همراه با خطاست و می‌توان گفت خطا جزء لاینفک آن‌هاست [۱۲]. برای پی بردن به انواع خطاها و حذف عوامل ایجاد خطا تا حد امکان، از روش تحلیل عدم قطعیت^۱ استفاده می‌شود. با استفاده از تحلیل عدم قطعیت می‌توان با شناسایی منابع اصلی خطا، میزان تأثیر آنها بر نتیجه آزمون را مشخص کرد و احتمال تصمیم‌گیری غلط را کاهش داد. به طور کلی تحلیل خطا و مقادیر عدم قطعیت با محاسبه جداگانه خطای اتفاقی و خطای سیستماتیک صورت می‌گیرد. خطای سیستماتیک را با کالیبراسیون و خطای اتفاقی را تنها با تکرار آزمایشها می‌توان کاهش داد.

در این آزمایش برای به حداقل رساندن منابع ایجاد خطا و عدم قطعیت، تمام نمونه‌ها از یک فولاد ساخته شده و همه مراحل ماشینکاری، سنگ‌زنی، تنش‌زدایی، مرحله اول عملیات حرارتی بازپخت نمونه‌ها، سختی‌سنجی، اندازه‌گیری چگالی و خواص فراصوتی به صورت یکسان انجام شده است و تنها با تغییر زمان

۶- تحلیل نتایج

با دانستن سرعت‌های طولی و عرضی امواج فراصوتی، مطابق استاندارد ASTM می‌توان خواص مکانیکی میکروساختارها را مطابق معادلات (۴-۷) به دست آورد [۳].

$$\sigma = \frac{1 - 2\left(\frac{V_s}{V_l}\right)^2}{2\left(1 - \left(\frac{V_s}{V_l}\right)^2\right)} \quad (4)$$

$$E = \frac{\rho V_s (3V_l^2 - 4V_s^2)}{V_l^2 - V_s^2} \quad (5)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (6)$$

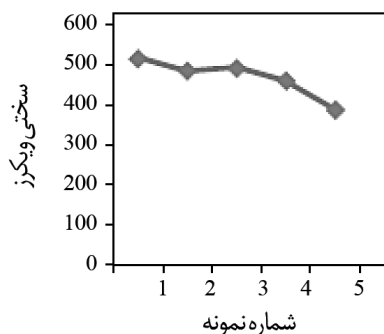
$$K = \rho \left(V_l^2 - \frac{2}{3} V_s^2 \right) \quad (7)$$

در این معادلات V_s سرعت عرضی (m/s)، V_l سرعت طولی (m/s)، V نسبت پواسون، E مدول الاستیسیته (MPa)، G مدول برشی (MPa) و K مدول حجمی (MPa) است. قابل ذکر است که در روش‌های معمولی به دلیل اختلاف بسیار جزئی این خواص، معمولاً نمی‌توان تمایزی بین خواص میکروساختارها به صورت دقیق مشاهده کرد. خواص فراصوتی و مکانیکی نمونه‌های بازپخت شده در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

جدول (۲) نتایج اندازه‌گیریهای ساختارهای مختلف.

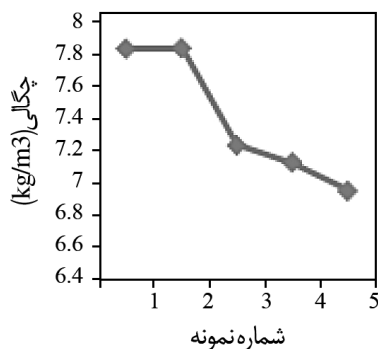
ساختار ۱	ساختار ۲	ساختار ۳	ساختار ۴	ساختار ۵	
۵۱۷/۸۸	۴۸۷/۴۴	۴۹۳/۷۱	۴۶۲/۴۰	۳۸۹/۲۵	سختی برینل
۷/۸۳۵	۷/۸۳۹	۷/۲۳۴	۷/۱۲۹	۶/۹۵۰	چگالی ()
۵۹۶۲/۲۰	۵۹۶۹/۴۶	۵۹۷۳/۶۸	۵۹۸۳/۹۱	۵۹۹۸/۵۰	سرعت طولی (m/s)
۳۲۰۹/۷۰	۳۲۱۶/۶۹	۳۲۱۷/۳۲	۳۲۲۷/۹۱	۳۲۴۱/۱۲	سرعت عرضی (m/s)
۰/۲۹۵۹۶	۰/۲۹۸۳۲	۰/۲۹۵۷۰	۰/۲۹۴۷۹	۰/۲۰۳۸۳	نسبت پواسون
۶۵/۲۲۳	۶۵/۴۸۴	۶۰/۲۷۹	۵۹/۵۹۹	۵۸/۲۸۹	مدول الاستیسیته (MPa)
۸۰/۷۶۹	۸۱/۱۲۱	۷۴/۸۳۸	۷۴/۲۹۰	۷۳/۰۰۹	مدول برشی (MPa)
۱۷۱/۰۰۳	۱۷۴/۰۷۸	۱۵۸/۲۱۶	۱۵۶/۲۵۱	۱۵۲/۳۰	مدول حجمی (MPa)

شکل (۳) روند تغییر سختی فولادها 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. علت افزایش سختی در مرحله بازپخت تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت و ایجاد کاربیدهای آلیاژی است.



شکل (۳) روند تغییر سختی در نمونه‌های مختلف.

نحوه تغییر چگالی در شکل (۴) نشان داده شده است. چگالی میکروساختارها نیز مشابه سختی آنها، با کاهش دمای بازپخت افزایش می‌یابد.



شکل (۴) روند تغییر چگالی در نمونه‌های مختلف.

همانطور که در شکل (۵) دیده می‌شود، نحوه تغییرات سرعت‌های طولی و عرضی امواج فراصوتی روند مشابهی دارند و با کاهش سختی میکروساختارها، مقدار سرعتها افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند زمانیکه قطعه‌ای سخت شده و در آن میکروساختار مارتنزیت تشکیل شود، به دلیل ریزتر شدن دانه‌بندی نمونه‌ها، سرعت امواج صوتی طولی و عرضی در آنها کمتر و چگالی بیشتر می‌شود. یعنی بیشترین سختی و کمترین

۷- نتیجه گیری

در این مقاله با اندازه گیری سرعت های طولی و عرضی امواج فراصوتی در فولاد AISI 4140، خواص مکانیکی این فولاد به دست آمد. با انجام تحلیل عدم قطعیت، مشخص شد که نتایج حاصل از اندازه گیری سرعت های طولی و عرضی و نهایتاً خواص مکانیکی به دست آمده از آن ها، با دقت بسیار بالایی تخمین زده شده است. مزیت استفاده از این روش نسبت به روش های مورد استفاده پیشین، غیرمخرب بودن، سریعتر و دقیق تر بودن آن است.

همچنین مشاهده شد که با سخت تر شدن میکروساختارهای فولاد AISI 4140، سرعت امواج فراصوتی و مدول الاستیسیته و برشی کاهش و مقدار چگالی افزایش یافته است. علت اساسی این امر، تفاوت در اندازه دانه میکروساختارهاست که بر اثر فرایندهای مختلف عملیات حرارتی ایجاد شده اند.

مراجع

[۱] الوک نایار، مترجمین حسن غیاثوند، حجت اله عالی،

محمد رضا رهگذر راهنمای جامع فولاد، تهران: جهان جام جم، ۱۳۸۴.

[2] Vasudevan M., Palanichamy P., Characterization of Microstructural Changes During Annealing of Cold Worked Austenitic Stainless Steel Using Ultrasonic Velocity Measurements and Correlation with Mechanical Properties, Jmpege, 11, 2002, pp. 169-179. ASTM Standard,

[3] Designation: E 797 – 95, Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method.

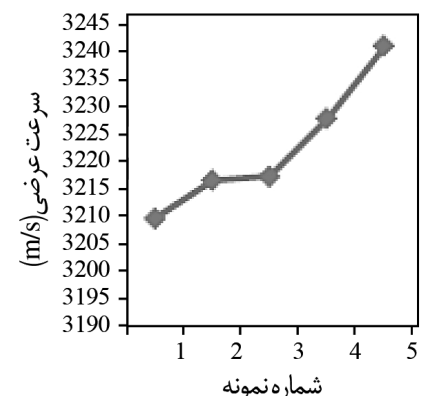
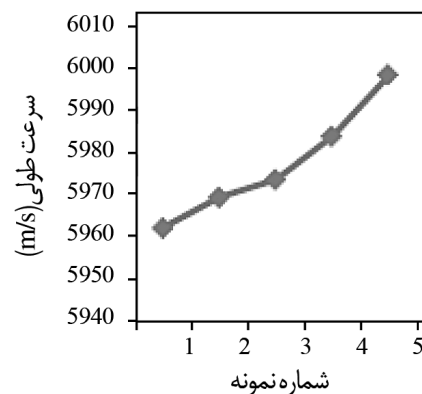
[4] Rajendran V., Palanivelu N., Chaudhuri B. K., A device for the measurement of ultrasonic velocity and attenuation in solid materials under different thermal conditions, *Measurement*, 38, 2005, pp. 248-25.

[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*, 60, 2009, pp. 234-239.

سرعت فراصوت برای ساختار مارتنزیت و کمترین سختی و بیشترین سرعت صوت برای ساختار پرلیت درشت است.

با تعمیم نتایج فوق می توان گفت که در فولاد AISI 4140، در میکروساختارهای مارتنزیت، بینیت، پرلیت ریز و پرلیت درشت، به ترتیب سختی و چگالی کاهش و سرعت امواج طولی و عرضی و مدول الاستیسیته و برشی افزایش می یابند. نسبت سرعت موج طولی به عرضی حدوداً برابر ۱/۸۵ یا ۱/۸۴ است.

با محاسبه خواص مکانیکی طبق معادلات (۴) تا (۷)، دیده می شود که این خواص در سخت ترین ساختار بیشترین مقدار و با کاهش سختی، این خواص نیز کاهش می یابند. تنها ساختار دوم از این روند تبعیت نمی کند که علت آن را می توان ناکامل بودن فرایند عملیات حرارتی آن دانست.



شکل (۵) خواص فراصوتی نمونه های فولاد AISI 4140: (الف) سرعت

طولی (ب) سرعت عرضی.

- [16] ASTM Standard, Designation: E 797 – 95, Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method.
- [17] ASTM Standard, Designation: E 127, Standard Practice for Fabricating and Checking Aluminum Alloy Ultrasonic Standard Reference Blocks.
- [18] ASTM Standard, Designation: E 214, Standard Practice for Immersed Ultrasonic Examination by the Reflection Method Using Pulsed Longitudinal Waves.
- [6] Carreon H., Ruiz A., Medina A., Barrera G., Zarate J., Characterization of the alumina–zirconia ceramic system by ultrasonic velocity measurements, *Materials Characterization*, 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*, 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, August 1980.
- [9] Gur C. H., Tuncer B. O., Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement, *Materials Characterization*, 55, 2005, pp.160– 166.
- [10] ASTM Standard, Designation:E 214, Standard Practice for Immersed Ultrasonic Examination by the Reflection Method Using Pulsed Longitudinal Waves.
- [11] ASTM Standard, Designation: E 1001, Standard Practice for Detection and Evaluation of Discontinuities by the Immersed Pulse-Echo Ultrasonic Method Using Longitudinal Waves.
- [۱۲] رنجبر، ابوالفضل، حاجی‌زاده، عبدالحسین، تنوری خطاها، تهران، مقدس، ۱۳۸۸.
- [۱۳] دشتی زاده، مرتضی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۵.
- [۱۴] قربانی سالخورد، محسن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۳.
- [15] Colman H. W., Steel W. G., *Experimental and Uncertainty Analysis for Engineers*, 2th Edition, John wiley and Sons Inc, 1999.