

بررسی تجربی اثر پیرسازی بر خواص مکانیکی و ارتعاشی فولادهای کربنی SA516

محمد حمیصی¹، سید ابراهیم موسوی ترشیزی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
* تهران، صندوق پستی 16765-1719، e_moussavi@sbu.ac.ir

چکیده

تغییرات ساختاری هنگام بهره‌برداری در شرایط فوق گرمایش بلندمدت مهم‌ترین عامل افت خصوصیات مکانیکی و موجب کاهش عمر قطعات داغ در صنایع است. با توجه به دشواری یا هزینه‌بر بودن آزمون‌های مورد نیاز برای ارزیابی عمر باقی‌مانده، جستجوی روشی غیرمخرب، آسان و دقیق برای تخمین عمر باقی‌مانده قطعات داغ و ارزیابی عمر باقی‌مانده آن‌ها ضروری است و مزایای اقتصادی فراوانی دارد. هدف از این پژوهش بررسی اثر تغییرات ساختاری بر فرکانس طبیعی و ضرایب میرایی نمونه‌هایی از فولاد کربنی SA516-Grade55 است تا در صورت وجود اثرات معنی‌دار، این روش برای فلزات دیگر و به ویژه قطعات داغ نیروگاهی توسعه داده شود. در این پژوهش تغییرات ساختاری شدیدی با انجام عملیات حرارتی پیرسازی بر نمونه‌ها ایجاد گردید، به طوری که پرلیت تجزیه شده و به فریت و کاربیدهای کروی شکل در مرزها تبدیل شد. با افزایش تغییرات ساختاری مشخص گردید که فرکانس‌های طبیعی مود اول تا ششم و ضریب کشسانی کاهش و ضرایب میرایی و کاهش لگاریتمی افزایش محسوس می‌یابند. این نتایج امیدبخش تدوین یک روش نوین غیرمخرب برای تخمین عمر باقی‌مانده برای قطعات با جنس‌های مختلف در شرایط بهره‌برداری فوق گرمایش بلندمدت است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 دی 1396
پذیرش: 15 فروردین 1397
ارائه در سایت: 07 اردیبهشت 1397
کلیدواژه‌ها:
تخمین عمر باقی‌مانده
فولاد کربنی
پیرسازی
تغییرات ساختاری
خواص مکانیکی و ارتعاشی

Experimental study of aging effect on mechanical and vibrational properties on carbon steel SA516

Mohammad Hamisi¹, Seyed Ebrahim Moussavi Torshizi^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
* P.O.B. 16765-1719 Tehran, Iran, e_moussavi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 January 2018
Accepted 04 April 2018
Available Online 27 April 2018

Keywords:

Life estimation
Carbon steel
Aging
Microstructural change
Mechanical and Vibrational properties

ABSTRACT

In long-term overheating conditions, structural changes are the most important cause of mechanical deterioration and reduce the life of hot components. Given the difficulty or costliness of tests needed to assess the remaining life, searching for a non-destructive, simpler and more accurate way to estimate the remaining life of hot components and assess their remaining life is essential and have many economic benefits. The purpose of this study is to investigate the effect of structural changes on natural frequencies and damping coefficients of samples of carbon steel SA516-Grade55 so that, if there are significant effects, this method will be developed for other metals, in particular hot power plant parts. In this research, severe structural changes were observed on the samples by performing heat treatment of aging. As perlite decompose into ferrite and spheroidal carbides in the boundaries. With increasing structural changes, it was found that the natural frequencies of the first to sixth modes and the elastic modulus are decreased and the coefficients of damping and logarithmic decrease are increased significantly. These promising results are the elaboration of a non-destructive new method for estimating the remaining life for components of different types under long-term overheated operation conditions.

مدت قطعات در دماهایی است که در آن به تدریج تغییرات ساختاری رخ می‌دهد.

نخستین روش‌های کیفی برای تخمین عمر توسط دو دانشمند به نام‌های دوبرزانسکی و هرناس پیشنهاد شده است. آن‌ها نمونه‌هایی از لوله‌های 1Cr-0.5Mo در حال بهره‌برداری را تهیه و برای تخمین عمر مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها ارتباط روشنی را بین استحکام گسیختگی و دسته‌های ریزساختاری براساس میزان کروی شدن کاربیدها نشان داد [2]. بهره‌برداری در دماهای بالا منجر به تغییرات ریزساختاری گوناگونی نظیر

1- مقدمه

تخمین عمر قطعاتی که در دمای بالا بهره‌برداری می‌شوند یکی از موضوعات مهم در صنعت نیروگاهی است. تخمین عمر با سه روش محاسباتی، آزمون‌های مخرب و آزمون‌های غیرمخرب امکان‌پذیر است. در این روش‌ها عمر قطعات براساس تاریخچه بهره‌برداری، تغییر خواص مواد، تغییرات ساختاری و... تخمین زده می‌شود. پره‌های توربین گاز و لوله‌های بویلر هنگام بهره‌برداری، تحت بیش‌گرمایش بلندمدت، خزش و به‌ویژه تغییرات ساختاری قرار می‌گیرند [1]. شرایط بیش‌گرمایش بلندمدت به معنای قرارگیری طولانی

اتم‌های کربن در اثر کارکرد نمونه‌های ساخته شده از فولادهای کربنی در دمای بالا در بلندمدت از فاز پرلیت به مرزخانه‌ها مهاجرت نموده و شبکه کاربید در مرزخانه‌ها تشکیل می‌گردد. این اولین مرحله خرابی قطعه است و در مرحله بعد فاز کاربید علاوه بر مرزخانه‌ها در داخل دانه‌های پرلیت نیز رسوب می‌کند. در ادامه کاربیدها در تمام زمینه پخش شده و به هم می‌پیوندند که نتیجه آن تشکیل دانه‌های درشت تر کاربید است. این فرایند در نهایت منجر به کاهش استحکام و شکست قطعه می‌شود [8].

اگر تغییرات ساختاری بر فرکانس طبیعی و میرایی نمونه فولادی تأثیر قابل ملاحظه داشته باشد، در این صورت انتظار می‌رود با توسعه این روش و با اندازه‌گیری فرکانس طبیعی و میرایی از طریق آزمون ضربه چکش^۲، بتوان تغییرات ساختاری را بدون انجام متالوگرافی، ارزیابی نموده و عمر باقی مانده را تخمین زد.

2- آنالیز مودال

آنالیز مودال فرایند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی، شکل مودها و به‌کارگیری آن‌ها به منظور ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم است. این مدل ریاضی، مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شوند.

آنالیز مودال بر پایه این حقیقت استوار است که پاسخ ارتعاشات یک سیستم دینامیکی خطی ثابت با زمان^۳ را می‌توان به صورت ترکیب خطی یک مجموعه حرکت هارمونیک ساده نمایش داد که مودهای طبیعی ارتعاشی نام دارند [12].

انجام آنالیز مودال برای درک بهتر رفتار دینامیکی سازه‌ها و بهینه‌سازی خصوصیات دینامیکی آن‌ها ضروری است و با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از آن می‌توان سازه‌هایی سبک‌تر، ایمن‌تر، مقاوم‌تر و با بازده بالاتر ساخت. در حال حاضر آنالیز مودال از مهندسی خودرو و هوافضا تا بیومکانیک، پزشکی و علوم پایه گسترده شده است، به گونه‌ای که آنالیز مودال تجربی و عددی با روش اجزای محدود به دو رکن اساسی در دینامیک سازه تبدیل شده‌اند [13].

2-1 آنالیز مودال تئوری

با توجه به این که در این پژوهش ابعاد نمونه‌ها به صورت تیر دارای مقطع مستطیل شکل بوده و نسبت طول به ضخامت تیر بیش از 8 است و از خیز حاصل از نیروی برشی عرضی در مقابل خمش می‌توان صرف‌نظر کرد؛ بنابراین از تئوری تیر اولر- برنولی استفاده می‌شود. فرکانس طبیعی اول تیر دو سر آزاد به صورت رابطه (1) است [12].

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{22.373}{L^2} \right] \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

2-2 آنالیز مودال تجربی

آنالیز مودال در حوزه فرکانسی براساس برازش منحنی روی داده‌های تست به کمک یک مدل ریاضی از پیش تعیین شده روی سازه مورد نظر است. این مدل شامل اطلاعات مربوط به تعداد درجات آزادی سازه، مدل میرایی و احتمالاً تعداد مودهای ارتعاشی در محدوده فرکانسی اندازه‌گیری است. فرضیات مدل عبارات ریاضی برازش منحنی مربوط به هر پاسخ فرکانسی را

تغییر در ترکیب شیمیایی فریت، ساختار، اندازه و فاصله بین کاربیدها، استحکام محلول جامد و پارامتر شبکه در فولاد می‌شود. تمام این تغییرات توسط کوشیما و همکاران روی فولاد 1Cr-0.5Mo که در دماهای بالا و تنش‌های مختلف تحت آزمایش خزش بررسی و مشاهده شد که فاصله بین ذره‌های کاربیدها معنی‌دارترین و مفیدترین پارامتر است. مرتبط ساختن فاصله بین ذرات کاربید با عمر خزشی بارزترین نکته این مدل است [3].

آداود و همکاران خصوصیات مکانیکی لیتیم-آلومینیوم و آلومینیوم-مس-لیتیم را با تغییر زمان و دمای پیرسازی بررسی کردند. ابتدا مدول یانگ افزایش یافته و سپس حدود 5% کاهش می‌یابد. تغییرات مدول برشی مانند مدول یانگ است و ضریب پواسون تغییر نمی‌کند [4].

ایتو و همکاران تأثیر پیرسازی روی میرایی و مدول یانگ آلیاژهای TiNi را بررسی کردند. پیرسازی در دمای 573 و 673 درجه کلونین به مدت نیم‌ساعت و 128 ساعت انجام شد. در این شرایط مدول یانگ کاهش و ضریب میرایی مخصوص به شدت افزایش یافت [5].

لونت یاگمر تأثیر میکروساختار بر اصطکاک داخلی و مدول یانگ آلیاژ مس-برلیم پیر شده را بررسی کرد. این تحقیقات نشان داد اصطکاک داخلی و وابستگی به تنش پس از 2 ساعت پیرسازی در دمای 315 درجه سانتی‌گراد کم است و مدول یانگ در پیرسازی طولانی نسبت به پیرسازی کوتاه‌مدت حدود 2 گیگاپاسکال افزایش می‌یابد [6].

تاناکا تأثیر اندازه دانه و میکروساختار روی انرژی داخلی و مدول یانگ فولاد با مقاومت بالا HT-80 را بررسی کرد و نشان داد انرژی داخلی با کاهش اندازه دانه نمونه‌ها افزایش می‌یابد، همچنین انرژی داخلی نمونه‌های با ساختار فریت-پرلیت بسیار بیشتر از نمونه‌های با اندازه دانه بزرگ و ساختار فریت-سمنتیت است [7].

حمیدنیا و همکاران خواص مکانیکی فولاد عملیات حرارتی شده AISI D6 را به روش غیرمخرب فراصوتی اندازه‌گیری نموده‌اند. 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 با روش‌های غوطه‌وری و تماسی و با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری شده است [9].

رهنما و همکاران بر لوله فولادی D6AC به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف عملیات حرارتی بر خواص نمونه مطالعه و خواص مکانیکی و تغییرات ریزساختار پوسته شکل‌دهی شده را بررسی نموده‌اند [10].

میرزایی و همکاران خواص مکانیکی ریزساختار مارتنزیت بازگشت داده شده با ریزساختار سه‌فازی فریت-بینیت-مارتنزیت در فولاد کم‌آلیاژ پر استحکام 42CrMo4 را بررسی کرده‌اند [11].

در زمان بهره‌برداری بلندمدت فولادها در دماهای کمتر از دمای یوتکتوئید^۱ تغییرات ساختاری اتفاق می‌افتد. در اثر این پدیده که سبب تجزیه پرلیت به فریت و کاربیدهای کروی می‌شود، استحکام و سختی فولاد کاهش می‌یابد [8].

فولادهای کربنی به دلایلی نظیر قیمت مناسب، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مناسب و قابلیت شکل‌دهی بالا به طور گسترده‌ای برای کار در دماهای بالا در نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. در این پژوهش، نمونه‌هایی از فولاد کربنی SA516-GR55 برای بررسی اثر تغییرات ساختاری بر فرکانس طبیعی و میرایی تهیه شده است.

² Hammer

³ Linear Time-Invariant

¹ AC1

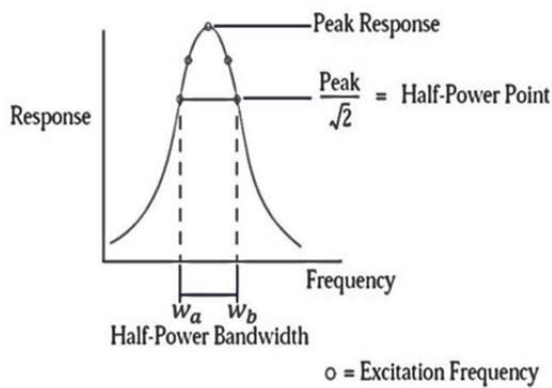


Fig.1 Diagram of maximum of frequency response function

شکل 1 نمودار ماکزیمم دامنه تابع پاسخ فرکانسی

آنالیز مودال تجربی شامل سه مرحله آماده‌سازی برای تست، اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و استخراج پارامترهای مودال است. برای بالا بردن ضریب اطمینان و کاهش خطا از هر نمونه سه قطعه تهیه شد. ابعاد نهایی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی $147.80 \times 29.30 \times 5.20 \text{ mm}^3$ است. ابعاد تمامی نمونه‌ها با دقت 0.02 میلی‌متر با هم برابر، سپس تمام نمونه‌ها با دقت 0.02 گرم برابر 160.00 گرم شده‌اند.

در شکل 2 نمای کلی دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری تست مودال با ضربه نشان داده شده است. تابع پاسخ فرکانسی پس از اندازه‌گیری سیگنال‌های زمانی پاسخ و ضربه و اعمال تبدیل فوری سریع⁶ به آن محاسبه می‌شود.

تست فرکانس در این پژوهش با شرایط مرزی دوسر آزاد برای نمونه‌ها انجام می‌گیرد. سنسور به کار رفته در این تست از آلیاژ تیتانیوم و به وزن 0.14 گرم است. تست فرکانس از هر نمونه پنج بار گرفته شده و فرکانس نهایی میانگین فرکانس‌های اندازه‌گیری شده است. نتایج پاسخ فرکانسی و پارامترهای مودال از طریق نرم‌افزار ای‌دی‌ام⁷ در شکل 3 نشان داده شده است.

4- عملیات حرارتی

عملیات حرارتی پیرسازی⁸ شتابدار یکی از روش‌های تغییر سریع ساختار در فولادهاست. برای تغییرات ساختاری سریع فولاد مورد بررسی، که از نوع فولادهای کربنی است، عملیات حرارتی پیرسازی در محدوده 590-700 درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود [16]. نمونه‌ها به مدت 12 و 24 ساعت و در دمای 680 درجه سانتی‌گراد عملیات حرارتی می‌شوند. نتایج متالوگرافی

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد SA516 Grade55

Table 1 Chemical composition of SA516 steel

عنصر	C	Si	Mn	P	S	مرجع
	< 0.18	0.15-0.4	0.6-0.9	< 0.035	< 0.035	[16]
آزمون کوانتومتری نمونه‌ها	0.15	0.2	0.9	0.012	0.008	

⁶ Fast Fourier transform

⁷ Engineering Data Management

⁸ Aging Heat treatment

دیکنه می‌کند. در نتیجه کار اصلی در این بخش برآزش منحنی به منظور استخراج پارامترهای مودال به کمک داده‌های تجربی است.

روش‌های بسیاری برای آنالیز مودال وجود دارد. روش مورد استفاده در این پژوهش پیک-پیکینگ¹ است که هالف-پاور² نیز نامیده می‌شود. در این روش با داده‌های در محدوده رزونانس، مانند داده‌های یک سیستم یک درجه آزادی برخورد می‌شود [14]. مراحل این روش به شرح زیر است.

2-2-1- تخمین فرکانس طبیعی

فرکانس طبیعی مود انتخاب‌شده با توجه به مقدار پیک تابع پاسخ فرکانسی³ مطابق رابطه (2) حاصل می‌شود.

$$w_r = w_{\text{peak}} \quad (2)$$

2-2-2- تخمین میرایی

میرایی خاصیتی از ماده است که به وسیله آن انرژی مکانیکی در یک سیستم ارتعاشی تلف می‌شود و معمولاً به صورت تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی گرمایی است.

تست میرایی با استفاده از روش پاسخ ضربه فرکانسی با ارتعاشات تیر دوسر آزاد در دمای اتاق جهت اندازه‌گیری خصوصیات میرایی مواد انجام می‌گیرد. پس از تحریک نمونه با ضربه چکش، فرکانس ارتعاشی و کاهش دامنه به وسیله شتابسنج اندازه‌گیری شده و به رایانه منتقل می‌شود. کاهش دامنه، تابع زمان و مود ارتعاشی است که با استفاده از نرم‌افزارهای پردازش پالس تشخیص داده می‌شود.

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است ابتدا بیشینه دامنه به دست می‌آید که مربوط به فرکانس طبیعی اول (مود اول ارتعاشی) سیستم است، سپس فرکانس‌های (w_a, w_b) در دو طرف پیک رزونانسی با دامنه $Peak/\sqrt{2}$ انتخاب می‌شوند.

ضریب اتلاف میرایی⁴ با توجه به عرض پیک رزونانسی و مطابق رابطه (3) به دست می‌آید [15].

$$\eta_r = \frac{w_b^2 - w_a^2}{2w_r^2} \quad (3)$$

که w_r فرکانس بیشینه دامنه نمودار و w_a, w_b فرکانس در دو طرف پیک رزونانسی هستند. نسبت میرایی سازه‌ای به صورت رابطه (4) است.

$$\xi = \frac{\eta}{2} \quad (4)$$

برای میرایی‌های کوچک ($1 \ll \xi$) پارامتر کاهش لگاریتمی δ به صورت رابطه (5) تعریف می‌شود [15].

$$\delta = \pi Q^{-1} \quad (5)$$

اصطکاک داخلی⁵ با استفاده از پهنای باند Δw به دست می‌آید و به صورت رابطه (6) است [15].

$$Q^{-1} = \frac{w_b - w_a - \Delta w}{2w_r} \quad (6)$$

3- مواد و تجهیزات آزمایش

ماده مورد استفاده در این پژوهش فولاد SA516-grade 55 است. این فولاد کربنی و کم آلیاژ و از نوع فولاد فریتی پرلیتی است. ترکیب شیمیایی نمونه برحسب درصد وزنی در جدول 1 آمده است. این ترکیب توسط آزمون کوانتومتری نمونه‌ها نیز تأیید شده است.

¹ Pick picking

² Half-power

³ Frequency Response Function -FRF

⁴ Loss factor

⁵ Internal friction

کشش در جدول 2 ارائه شده است. این نتایج با مطالعات پیشین همخوانی دارند [18].

فرکانس طبیعی مود اول تیر در حالت دو سر آزاد با رابطه (1) محاسبه می‌شود. طول، ممان اینرسی مقطع، مساحت مقطع و چگالی همه نمونه‌های سالم و عملیات حرارتی شده با هم برابر بوده و تنها در مدول یانگ تفاوت دارند. با کاهش مدول یانگ انتظار می‌رود فرکانس طبیعی محاسبه شده مود اول نیز کاهش یابد. فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از تست مودال در جدول 3 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فرکانس طبیعی مود اول نمونه‌ها با افزایش زمان عملیات حرارتی کاهش می‌یابد.

جدول 4 ضرایب میرایی تجربی را با استفاده از روابط (2-6) برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. در جدول 5 فرکانس طبیعی دوم تا ششم نمونه‌ها و در جدول‌های 6 و 7 به ترتیب ضریب میرایی و کاهش لگاریتمی متناظر با این فرکانس‌ها ارائه شده است. همان‌طور که در جدول‌های 4، 6 و 7 مشاهده می‌شود ضریب میرایی افزایش یافته است، زیرا سطح مشترک دو فاز زمینه و تقویت‌کننده افزایش پیدا کرده که ناشی از رسوب کاربیدها در مرزدانه‌هاست [21]. کاهش لگاریتمی در طول پروسه پیرسازی افزایش می‌یابد، چرا که کاهش لگاریتمی نشان‌دهنده تأثیر رسوبات در کاهش خواص مکانیکی است [7].

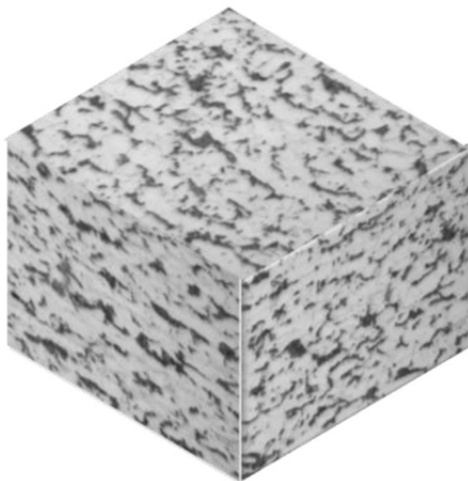


Fig. 4 The 3D microstructure of not treated sample

شکل 4 ریزساختار نمونه سالم در سه جهت

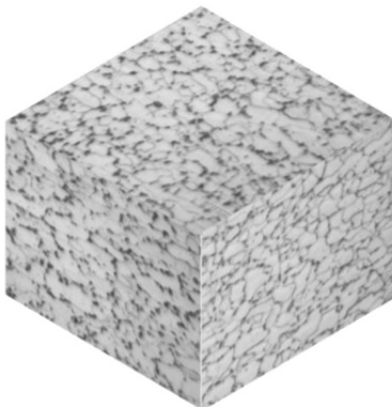


Fig. 5 The 3D microstructure of sample after 12 hours heat treatment

شکل 5 ریزساختار نمونه در سه جهت پس از 12 ساعت عملیات حرارتی

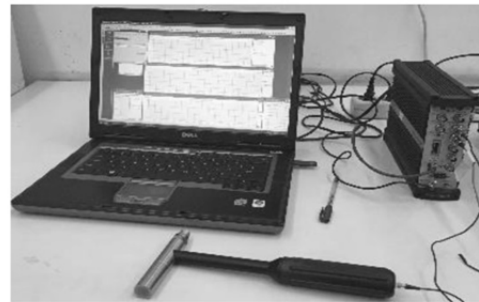


Fig. 2 The general schematic of hammer test with main required equipment

شکل 2 نمای کلی تست با چکش به همراه تجهیزات اصلی مورد نیاز

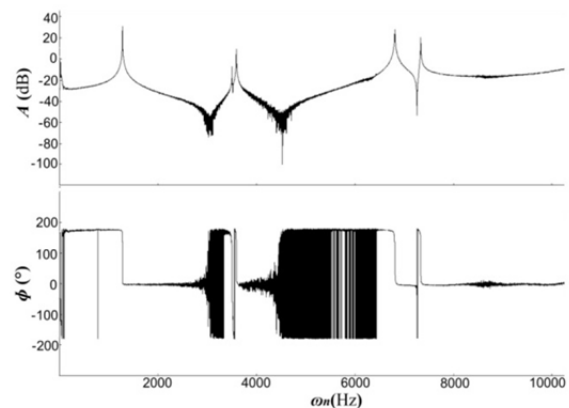


Fig. 3 Diagram of amplitude as frequency modal test

شکل 3 نمودار دامنه برحسب فرکانس تست مودال

نمونه‌ها نشان می‌دهد که در میکروساختار ماده تغییرات شدیدی ایجاد شده به طوری که نواحی پرلیت در ساختار فریتی-پرلیتی به صورت روشن و چشمگیری تجزیه شده است، ساختاری شامل فریت-کاربید آهن ایجاد شده و بیشتر رسوبات در مرزدانه‌های فریت تشکیل می‌شوند.

5- بررسی و تحلیل نتایج

شکل 4 ساختار نمونه سالم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود فازهای روشن فریت از فازهای تیره پرلیت به خوبی قابل تفکیک است. فازهای پرلیت با افزایش زمان پیرسازی به کره‌های کاربید آهن (سمنتیت) و فریت تجزیه می‌شوند [17]. لایه‌های فریت به فاز زمینه اضافه شده و کاربیدها رسوب می‌کنند (شکل 5). با گذشت زمان لایه‌های سمنتیت که به صورت پراکنده رسوب کرده‌اند در مرزدانه‌ها به هم می‌پیوندند و تشکیل کره‌های درشت کاربید می‌دهند (شکل 6)، همچنین حلالیت کربن‌های بین‌نشین فاز سمنتیت نیز در آهن بیشتر شده و حجم فاز کاربید را افزایش می‌دهند و سبب درشت‌تر شدن کاربید می‌شوند [18]. ذرات بزرگ‌تر به قیمت از دست رفتن ذرات کوچک‌تر رشد می‌کنند. این فرایند که آمادگی استوالد (جذب ذرات ریز به وسیله ذرات بزرگ‌تر) نامیده می‌شود بر اثر نفوذ رخ می‌دهد تا سطح مشترک کل بین دو فاز کاهش یابد. از طرفی آمادگی استوالد باعث کاهش استحکام و سختی ماده نیز می‌شود [19]. همچنین وجود کاربید در مرزدانه‌ها و کاهش کسر حجمی پرلیت تأثیر قابل‌توجهی در کاهش استحکام دارد [20].

نتایج آزمون کشش نمونه‌ها (سه نمونه از هر قطعه) نشان می‌دهد که مدول یانگ با افزایش زمان عملیات حرارتی کاهش می‌یابد. نتایج آزمون

جدول 6 ضریب میرایی نمونه‌ها مربوط به فرکانس‌های دوم تا ششم (10^{-3})*
Table 6 Damping coefficients of samples obtained from 2nd to 6th natural frequency (10^{-3})*

شماره فرکانس	نمونه سالم	نمونه 12 ساعته (% اختلاف)	نمونه 24 ساعته (% اختلاف)
2	6.231	17.985 (188.6%)	38.019 (510.2%)
3	6.491	18.061 (178.2%)	38.678 (495.9%)
4	6.814	18.512 (171.7%)	38.216 (460.9%)
5	6.027	18.296 (203.6%)	38.519 (539.1%)
6	6.398	18.328 (186.5%)	38.347 (499.4%)

جدول 7 کاهش لگاریتمی نمونه‌ها مربوط به فرکانس‌های دوم تا ششم (10^{-3})*
Table 7 Logarithmic Decrement of samples obtained from 2nd to 6th natural frequency (10^{-3})*

شماره فرکانس	نمونه سالم	نمونه 12 ساعته (% اختلاف)	نمونه 24 ساعته (% اختلاف)
2	20.914	56.219 (168.8%)	120.329 (475.4%)
3	20.142	57.954 (187.7%)	121.186 (501.7%)
4	20.569	57.864 (181.3%)	121.237 (489.4%)
5	20.813	57.324 (175.4%)	121.762 (485.0%)
6	20.675	57.736 (179.3%)	121.894 (489.6%)

6- نتیجه‌گیری

تغییرات ساختاری نمونه‌هایی از فولاد کربنی SA516-Grade55 با انجام عملیات حرارتی در دمای 680 درجه سانتی‌گراد به مدت 12 و 24 ساعت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد.

1- تغییرات ساختاری شدیدی با متالوگرافی نمونه‌ها مشاهده شد. پرلیت با افزایش زمان عملیات حرارتی (پیرسازی) تجزیه شده و به فریت و کاربیدهای کروی شکل در مرزدانه تبدیل شد.

2- عملیات پیرسازی در نمونه‌ها باعث کاهش استحکام مرزدانه‌ای می‌شود، تا جایی که مدول یانگ با افزایش زمان عملیات حرارتی 10.74% کاهش یافت.

3- فرکانس طبیعی مود اول نمونه‌ها با افزایش زمان عملیات حرارتی تا 4.54% کاهش یافت. فرکانس طبیعی مودهای دوم تا ششم فولاد کربنی نیز بین 4.14% تا 4.59% کاهش می‌یابند. به نظر می‌رسد تغییر فرکانس طبیعی نمونه‌ها در تمامی مودهای ارتعاشی اول تا ششم یکسان است.

4- با افزایش زمان عملیات حرارتی ضریب میرایی مود اول تا 5.855 برابر میزان اولیه خود افزایش می‌یابد، چرا که سطح مشترک دو فاز زمینه و تقویت‌کننده به دلیل رسوب کاربیدها در مرزدانه‌ها افزایش یافته است. با افزایش زمان عملیات حرارتی ضریب میرایی مودهای دوم تا ششم بین 5.609-6.391 برابر میزان اولیه خود افزایش یافته است.

5- کاهش لگاریتمی مود اول که نشان‌دهنده تأثیر رسوبات در کاهش خواص می‌باشند، با افزایش زمان عملیات حرارتی تا 5.861 برابر میزان اولیه خود افزایش پیدا کرده است. کاهش لگاریتمی در مودهای دوم تا ششم ارتعاشی نیز با افزایش زمان پیرسازی بین 5.754 تا 6.017 برابر میزان اولیه خود افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد تغییر ضرایب میرایی نمونه‌ها در تمامی مودهای ارتعاشی اول تا ششم یکسان است.

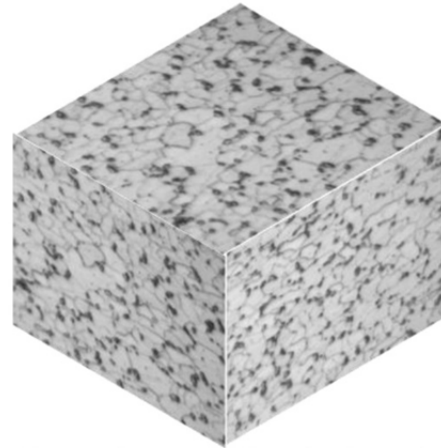


Fig. 6 The 3D microstructure of sample after 24 hours heat treatment

شکل 6 ریزساختار نمونه در سه جهت پس از 24 ساعت عملیات حرارتی

جدول 2 مدول یانگ نمونه‌ها به دست آمده از آزمون کشش

Table 2 Young modulus of samples obtained from the tensile test

ردیف	نوع نمونه	مدول یانگ (MPa)	% اختلاف
1	نمونه سالم	206365	-
2	نمونه 12 ساعته	196773	-4.65
3	نمونه 24 ساعته	184209	-10.74

جدول 3 فرکانس طبیعی اول نمونه‌ها به دست آمده از آنالیز مودال

Table 3 The first natural frequency of the samples obtained from the modal analysis

ردیف	نوع نمونه	فرکانس طبیعی (Hz)	% اختلاف
1	نمونه سالم	1277	-
2	نمونه 12 ساعته	1251	-2.04
3	نمونه 24 ساعته	1219	-4.54

جدول 4 ضرایب میرایی نمونه‌ها (10^3)*

Table 4 Damping coefficients of samples

ردیف	نمونه	ضریب میرایی	نسبت میرایی	کاهش لگاریتمی	% اختلاف
1	سالم	6.577	3.288	20.665	-
2	12 ساعته	18.437	9.218	57.757	180%
3	24 ساعته	38.509	19.254	121.124	485%

جدول 5 فرکانس طبیعی دوم تا ششم نمونه‌ها به دست آمده از آنالیز مودال

Table 5 The 2nd to 6th natural frequency of the samples obtained from the modal analysis

شماره فرکانس	نمونه سالم	نمونه 12 ساعته (% اختلاف)	نمونه 24 ساعته (% اختلاف)
2	3517	3442 (-2.15%)	3356 (-4.59%)
3	3598	3525 (-2.03%)	3439 (-4.42%)
4	6841	6704 (-2.00%)	6558 (-4.14%)
5	7350	7194 (-2.12%)	7013 (-4.59%)
6	11169	10942 (-2.03%)	10674 (-4.43%)

7- مراجع

- [11] M. Mirzayi, A. Salemi, A. Abdollahzade, Comparison of the mechanical properties of the microstructure of the returned martensitic and the microstructure of ferrite-binate-martensitic in steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 63-76, 2010. (in Persian فارسی)
- [12] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, pp. 115-123, New York: Prentice Hall, 5th edition, 2011.
- [13] S. S. Rao, *Vibration of Continuous Systems*, pp. 245-251 New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [14] A. Bertha, J. M. Roesset, Analytical evaluation of the accuracy of the half-power bandwidth method to estimate damping ratios in a structure, *Proceedings of The 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Zurich, Switzerland, July 22-24, 2009.
- [15] R. E. Maringer, *Damping Capacity of materials*, pp. 35-42, Ohio: Battelle Memorial Institute, Columbus Laboratories, 1966.
- [16] A. Valinejad, *Table and Standard of Steel (Steel Key)*, pp. 68-72, Tehran: Tarrah publish, 2012. (in Persian فارسی)
- [17] R. Visvanatan, *Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature -Components*, pp. 112-118, Ohio: ASM international society, 1995.
- [18] S. A. Kim, W. L. Johnson, Elastic constants and internal friction of martensitic steel, ferritic-pearlitic steel and α -Iron, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 452, No. 1, pp. 633-639, 2007.
- [19] R. W. Hertzberg, R. P. Vinci, J. L. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, pp. 108-112, New York: John Wiley & sons, 1989.
- [20] J. R. Davis, *Metals Handbook Desk Edition*, pp.1405-1407, Ohio: ASM International, 1998.
- [21] A. El-Morsy, A. I. Z. Farahat, Effect of aging treatment on the damping capacity and mechanical properties of Mg-6Al-1Zn alloy, *The Scientific World Journal*, Vol. 2015, No. 1, pp. 1-8, 2015.
- [1] S. E. Moussavi, *Super Heaters*, pp. 45-51, Tehran: Niroo Research Institute, 2008. (in Persian فارسی)
- [2] J. Dobrzański, A. Hernas, Correlation between phase composition and lifetime of 1Cr-0.5Mo steels during long-term service at elevated temperatures, *Materials Processing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 101-108, 1995.
- [3] Kushima, K. Kimura, F. Abe, K. Maruyama, Effect of microstructural change on creep deformation behaviour and long-term creep strength of 1Cr-0.5Mo steel, *the Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 86, No. 2, pp. 131-137, 2000.
- [4] M. E. O' Dowd, W. Ruch, E. A. Starke, Dependence of elastic modulus on microstructure in 2090-type alloys, *Physics colloques*, Vol. 48, No. C3, pp. 565-576, 1987.
- [5] K. Ito, T. Moroyama, I. Fukumoto, Effects of ageing on damping capacity of TiNi alloys, *Physics colloques*, Vol. 46, No. C10, pp. 645-648, 1985.
- [6] L. Yagmur, Effect of microstructure on internal friction and young's modulus of aged Cu-Be alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 523, No. 1, pp. 65-69, 2009.
- [7] M. Tanaka, H. Iizuka, Effects of grain size and microstructures on the internal friction and young's modulus of a high-strength steel HT-80, *Materials Science*, Vol. 26, No. 16, pp. 4389-4393, 1991.
- [8] J. Dobrzański, H. Krztoń, A. Zieliński, Development of the precipitation processes in low-alloy Cr-Mo type steel for evolution of the material state after exceeding the assessed lifetime, *Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 19-22, 2007.
- [9] M. Hamidnia, F. Honarvar, H. Khorsand, Accurate measurement of mechanical properties of tempered microstructures of AISI D6 alloy steel by ultrasonic nondestructive method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 48-58, 2012. (in Persian فارسی)
- [10] P. Rahnema, A. Abdollahzade, M. A. Mofid, The effect of heat treatment parameters on mechanical properties of D6AC steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 37, pp. 83-92, 2009. (in Persian فارسی)