

شبیه‌سازی فرآیند پیرسازی سوپر آلیاژ Ni-Span C 902 نورد سرد شده

محمدرسول معظمی گودرزی^{۱*}، مریم مرکباتی^۲، سید مهدی عباسی^۳ و حسن بدری^۴

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مواد- شناسایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- استادیار، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دانشیار، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- مربی، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

*Rasuolmoazami@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۳)

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی و پیش‌بینی تغییرات سختی سوپرآلیاژ Ni-Span C 902 نورد سرد و پیرسازی شده در دماها و زمان‌های مختلف پیرسازی می‌باشد. در این راستا نمونه‌های آئیل شده به میزان ۵۰ درصد نورد سرد و به مدت زمان‌های ۱۰^۵-۱۰^۲ ثانیه در محدوده دمایی ۴۵۰-۷۵۰°C تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند. تاثیر دما و زمان پیرسازی بعنوان پارامتر پیرسازی و کارسرد روی رفتار استحکام‌دهی آلیاژ توسط روش شبکه عصبی مصنوعی (ANNs) شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. رفتار سخت‌شدن، فوق‌پیری و نرم‌شدن حین پیرسازی توسط مدل ANN مشخص شد. حداکثر درصد نسبی سخت شدن برای آلیاژ نورد سرد نشده و ۵۰ درصد نورد سرد شده به ترتیب در محدوده پارامتر پیرسازی ۲۲ و ۲۱ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی:

سوپرآلیاژ Ni-Span C 902، شبیه‌سازی توسط مدل ANN، پیرسازی، کارسرد، درصد نسبی سخت شدن.

۱- مقدمه

قابل ملاحظه‌ای بالاتر از انواع آلیاژهای مشابه است. افزودن تیتانیم باعث عملیات‌حرارتی‌پذیر شدن آلیاژ با ایجاد رسوب بین‌فلزی نیکل و تیتانیم به نام γ شده است [۱-۲]. سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل دارای زمینه آستنیتی (γ) با شبکه مکعبی FCC هستند. آلیاژهای دوتایی آهن-نیکل هنگامی که تحت ترکیبی از عملیات تغییرشکل پلاستیک و عملیات حرارتی قرار گیرند، علاوه بر دارا بودن ضریب انبساط حرارتی اندک در محدوده

سوپرآلیاژ Ni-Span-C 902 یک آلیاژ بر پایه آهن-نیکل-کروم-تیتانیم بوده و به دلیل دارا بودن ضریب ترموالاستیک (TEC) اندک و مدول الاستیک (E) ثابت کاربردهای متنوعی در ساخت قطعات الاستیکی در معرض حرارت، سیستم‌های ارتعاشی، فیلترهای الکترومکانیکی، فنرهای مارپیچ و صاف مورد استفاده برای اندازه‌گیری وزن، دیافراگم‌ها و دریچه‌ها پیدا نموده است. این آلیاژ رسوب‌سخت شونده بوده و استحکام آن بطور

۲- روش انجام آزمایش

در این پژوهش از شمش سوپرآلیاژ Ni-Span-C 902، ذوب و آلیاژسازی شده در کوره ذوب القایی تحت خلاء^۱ (VIM) و تصفیه شده در کوره^۲ (ESR) با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول (۱)، استفاده شد. شمش حاصله پس از عملیات همگن-سازی و نورد گرم به مدت یک ساعت در دمای °C ۱۰۰۰ تحت عملیات آنیل انحلالی قرار گرفت و سپس نمونه‌ها در آب سرد شدند. یک قسمت از تسمه حاصله طی عملیات نورد سرد تحت کاهش ضخامت ۵۰ درصد قرار گرفت. تسمه نورد سرد نشده و ۵۰ درصد نورد سرد شده تحت عملیات پیرسازی در محدوده دمایی °C ۷۵۰-۴۵۰ با فاصله دمایی °C ۱۰۰ در محدوده زمانی ۱۰^۲-۱۰^۵ ثانیه قرار گرفتند و سپس در هوا سرد شدند. سختی نمونه‌ها توسط آزمون سختی سنجی ویکرز با بار ۳۰ کیلوگرم اندازه گرفته شد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ Ni-Span C 902 (درصد وزنی)

Ni	Fe	Cr	Ti	Co
۴۴/۸۱	۴۲/۶	۶/۹۵	۲/۳۷	۰/۸۴۵
Al	Mo	Nb	C	S
۰/۷۹۲	۰/۳۰۶	۰/۲۱۲	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۴

۳- مدل استفاده شده برای شبیه‌سازی توسط ANN

۳-۱- داده‌های شبکه

کارایی مدل ایجاد شده توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی، به پایگاه داده‌ای که در اختیار آن قرار می‌گیرد بستگی دارد. مجموعه داده‌های مقاله حاضر از مراجع [۱۳-۱۵] انتخاب و به سه گروه تقسیم شدند: ۷۰ درصد برای فرآیند یادگیری^۳، ۱۵ درصد برای تعیین اعتبار^۴ در حین فرآیند یادگیری و ۱۵ درصد برای آزمودن^۵ مدل آموخته. دما و زمان پیرسازی بعنوان مقادیر پارامتر پیرسازی، داده ورودی و مقادیر درصد نسبی سخت شدن، داده خروجی در نظر گرفته می‌شوند. این پارامترها در ادامه معرفی خواهند شد.

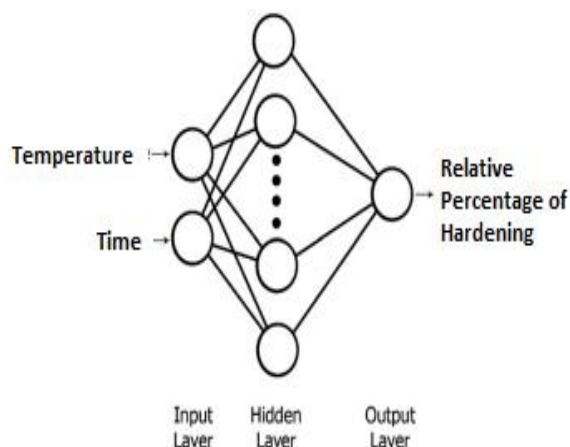
ترکیب آلیاژهای اینوار، دارای ضریب ترموالاستیک ثابت نیز هستند [۳-۴].

نتیجه مطالعات انجام گرفته روی آلیاژهای مشابه نشان داد [۵-۶] که از جمله عوامل تاثیرگذار روی پایداری فازها، اعمال تغییرشکل پلاستیک سرد بعد از عملیات انحلالی و قبل از پیرسازی است. انجام کارسرد روی فلزات و سوپرآلیاژها منجر به افزایش چگالی عیوب می‌شود. تغییرات استحکام آلیاژی که دارای ذرات منظم و هم‌سیما با زمینه هستند، در دمای محیط توسط تداخل بین نابجایی‌ها و ذرات با دو مکانیزم برش ذرات توسط نابجایی‌ها و عبور نابجایی از روی ذرات بررسی می‌شود [۷]. بهرحال فاز استحکام دهنده ۷ با افزایش دما و زمان پیرسازی ناپایدار می‌شود. هنگامی که این سوپرآلیاژ به مدت زمان طولانی در دمای بالا قرار گیرد، ممکن است فاز ۷ به فاز پایدار صفحه‌ای شکل استحاله یابد. حضور فاز با شبکه کریستالی هگزاگونال در دانه‌های زمینه منجر به تردی آلیاژ شده، سختی و خواص کششی را کاهش می‌دهد [۸-۹].

رفتار استحکام‌دهی آلیاژهای رسوب سخت شونده به پدیده‌های مختلف متالورژیکی شامل پیرسازی، فوق‌پیری و استحاله فازی وابسته است [۱۰]. مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار پیرسختی این آلیاژها اغلب کار پیچیده‌ای است. روش شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) یک ابزار قدرتمند در زمینه مدل کردن خواص آلیاژها به خصوص هنگامیکه رابطه خطی برقرار نباشد، است. بنابراین این روش جهت پیش‌بینی رفتار پیرسختی آلیاژها مناسب است [۱۱]. محققان متعددی [۱۰-۱۲] از روش ANN برای مدل کردن تاثیر دما و زمان پیرسازی بر رفتار سخت شدن آلیاژها استفاده کرده‌اند.

از آنجائیکه استحکام و سختی سوپرآلیاژ Ni-Span C 902 با انجام کارسرد و پیرسازی تغییر می‌کند، پیش‌بینی تغییرات خواص با انجام عملیات کارسرد و پیرسازی ضروری است. به همین دلیل در این پژوهش تاثیر کارسرد و دما و زمان پیرسازی بر رفتار سخت شدن سوپرآلیاژ Ni-Span C 902 توسط روش ANN پیش‌بینی و آنالیز شده است.

تشکیل می‌شود. شیوه آرایش لایه‌ها و المان‌ها در شبکه را معماری شبکه^۹ می‌نامند [۱۰]. معماری شبکه مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): معماری شبکه استفاده شده در این پژوهش

هرچند که استفاده از بیش از یک لایه پنهان در برخی موارد راندمان بالاتری ایجاد می‌کند، اما اصولاً شبکه‌های عصبی با یک لایه پنهان توانایی مدل کردن همه موارد کاربردی را دارند [۱۷]. بنابراین در این تحقیق، یک شبکه پیشرو با یک لایه پنهان استفاده شده است. تعداد بهینه المان‌ها در لایه پنهان توسط آزمایش و خطا تعیین شد. همچنین در تحقیق حاضر، از تابع غیرخطی تانژانت سیگموئید^{۱۱} (رابطه (۳)) در لایه پنهان استفاده شد.

$$Y = \tan \operatorname{sig}(X) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3)$$

۳-۵- فرآیند یادگیری

در شبکه‌های عصبی، بخش عمده‌ای از داده‌ها برای به دست آوردن ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی استفاده می‌شود. این کار با استفاده از فرآیند یادگیری توسط یک الگوی آموزشی^{۱۱} انجام می‌شود. معمولاً از الگوی محبوب انتشار به عقب^{۱۲} برای آموزش شبکه استفاده می‌شود. نرخ کاهش خطا در الگوی استاندارد اولیه، بسیار پایین است. به همین دلیل تغییراتی در الگوی اصلی داده شده و الگوهای جدیدتری به وجود آمده-

۳-۲- پارامتر پیرسازی

نمودارهای پیرسازی معمولاً سختی را بعنوان تابعی از دما برای یک زمان پیرسازی تعیین می‌کنند. در عمل زمان پیرسازی اغلب متفاوت است و روش تبدیل منحنی‌های پیرسازی از یک زمان به زمان دیگر می‌تواند ارزشمند باشد. این دو متغیر به شکل پارامتر پیرسازی لارسون-میلر یا هولومن-جف (P) [۱۶] به شکل رابطه (۱) تبدیل می‌شوند:

$$p = T(C + \log t) \times 10^{-3} \quad (1)$$

که در آن T دما به کلوین و t زمان به ساعت می‌باشد، درحالی‌که C ثابت مواد در محدوده ۲۰-۱۰ بوده و در اغلب کاربردها مقدار ۲۰ برای آن در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳- درصد نسبی سخت شدن

مقادیر سختی گزارش شده قبل و پس از عملیات پیرسازی بطور قابل ملاحظه‌ای به تغییرات ترکیب شیمیایی و نیز روش اندازه‌گیری سختی بستگی دارد. به منظور حذف این مشکل پارامتر بدون بعد درصد نسبی سخت شدن (H_t) در این پژوهش با رابطه (۲) در نظر گرفته شده است.

$$H_t = \left(\frac{H - H_{st}}{H_{st}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن H و H_{st} به ترتیب سختی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های پیرسازی شده و آنبیل شده می‌باشد.

۳-۴- معماری شبکه

شبکه پیشرو^۶ شبکه‌ای است تشکیل شده از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان^۷ و یک لایه خروجی که هر لایه، ورودی خود را از لایه قبلی دریافت و سپس خروجی خود را به لایه بعدی می‌فرستد. این شبکه، یکطرفه است یعنی حلقه پسر^۸ ندارد. بنابراین خروجی‌های هر لایه، هیچ اثری بر همان لایه و یا لایه‌های قبلی ندارند. هر لایه خود از چندین المان پردازنده

این روش، اطمینان بیشتری در مورد جلوگیری از تطبیق بیش از اندازه^{۱۷} شبکه وجود خواهد داشت [۱۷]. از روش ذکر شده در این مقاله استفاده شده است.

اند. یکی از پرکاربردترین آنها، الگوی Levenberg-Marquardt می باشد که سریعترین الگو برای شبکه‌هایی با اندازه متوسط است [۱۷]. در این مقاله از این روش استفاده شده است.

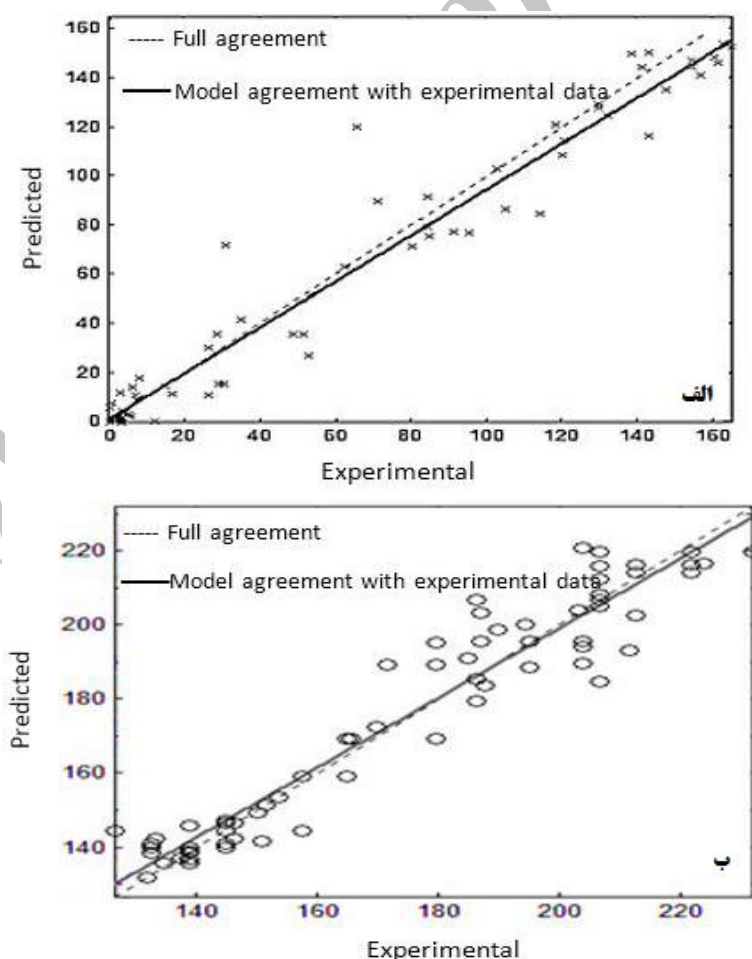
۳-۶- شیوه توقف فرآیند یادگیری

اگر شبکه عصبی بیش از حد آموخته^{۱۳} شود، شروع به بخاطر سپردن^{۱۴} داده‌ها می‌کند و از هدف اصلی که پیدا کردن ارتباط موجود در داده است، دور می‌شود. در این حالت، داده‌های مورد استفاده به خوبی در مدل جواب می‌دهند اما شبکه در مورد داده‌های جدید با مشکل مواجه می‌شود. یک روش مناسب برای محدود کردن تعداد دوره‌های تکرار^{۱۵}، استفاده از روش توقف اولیه^{۱۶} می‌باشد که در آن، به محض آنکه خطای حاصل از داده‌هایی که برای تعیین اعتبار مدل استفاده می‌شوند، شروع به افزایش کند، باید فرآیند یادگیری را متوقف کرد. با استفاده از

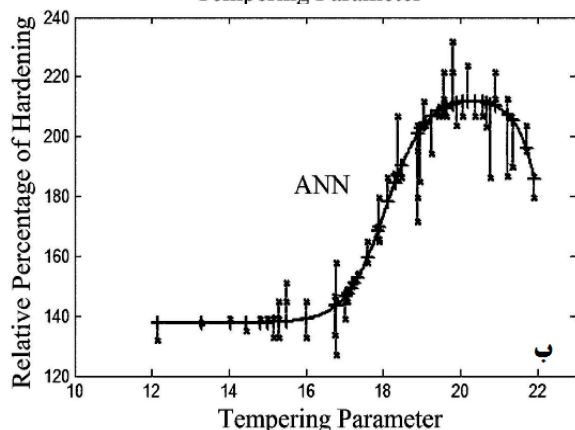
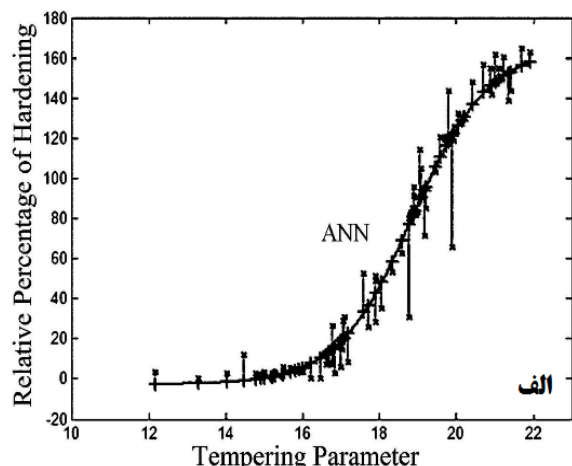
۴- نتیجه‌گیری و بحث

۴-۱- کارایی مدل

منحنی پراکندگی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده درصد نسبی سخت‌شدن آلیاژ نورد سرد نشده و ۵۰ درصد نورد سرد شده در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنی مربوط به پیش‌بینی مدل دارای تطابق خوبی با نتایج تجربی می‌باشد. بنابراین شبکه طراحی شده می‌تواند عملکردی بالایی در پیش‌بینی رفتار سخت‌شدن آلیاژ داشته باشد.



شکل (۲): منحنی عملکرد شبکه ANN در پیش‌بینی درصد نسبی سخت‌شدن: (الف): آلیاژ نورد سرد نشده و (ب): آلیاژ ۵۰ درصد نورد سرد شده



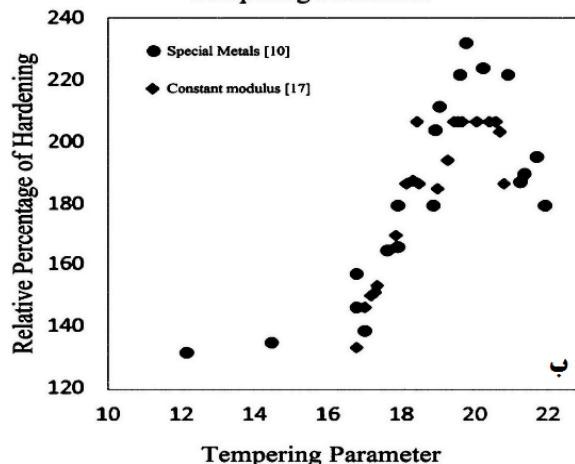
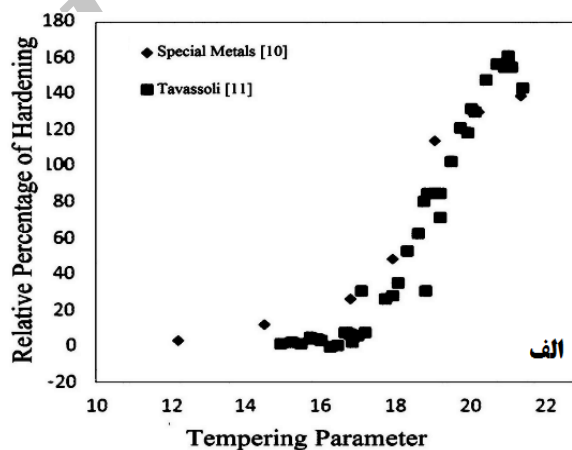
شکل (۴): منحنی‌های مربوط به شبیه‌سازی داده‌ها توسط مدل ANN: (الف): نمونه نورد سرد نشده و (ب): نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده سوپرآلیاژ Ni-Span C 902

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در پارامترهای پیرسازی کم تا مقدار برابر با ۱۵ تغییرات قابل ملاحظه درصد نسبی سخت شدن برای نمونه نورد سرد نشده و ۵۰ درصد نورد سرد شده مشاهده نمی‌شود. این رفتار مشاهده شده به کم بودن دما و زمان پیرسازی برای رسوب‌گذاری فاز γ مربوط است. برای نمونه نورد سرد نشده در محدوده پارامتر پیرسازی ۱۵-۲۲ و برای نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده در محدوده پارامتر پیرسازی ۱۵-۲۰، رسوب‌گذاری فاز γ منجر به افزایش سختی شده است. برای نمونه نورد سرد نشده درصد نسبی سخت شدن به نقطه پیک نمی‌رسد.

در نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده در پارامتر پیرسازی برابر با ۲۱ به علت انجام کار سرد و در نتیجه تسریع رسوب‌گذاری فاز γ

۴-۲- نتیجه شبکه ANN طراحی شده

در شکل (۳) اثر پارامتر پیرسازی بر رفتار سخت شدن نمونه نورد سرد نشده و ۵۰ درصد نورد سرد شده بر اساس اطلاعات بدست آمده از مراجع [۱۳-۱۵] نشان داده شده است. اطلاعات بدست آمده از شکل (۳-الف) شلوغی داده‌ها مخصوصاً در ناحیه مربوط به پارامتر پیرسازی ۱۷-۱۵ را نشان می‌دهد. همچنین این موضوع در شکل (۳-ب) در نواحی اطراف پیک و فوق-پیری مربوط به پارامتر پیرسازی ۲۱-۱۹ مشاهده شده است. بنابراین روش‌های معمول رگرسیون خطی و غیرخطی به منظور شبیه‌سازی این رفتار مناسب نیست. منحنی بدست آمده از روش ANN در شکل (۴) نشان داده شده است. این منحنی دارای تطابق خوبی با داده‌های بدست آمده است.



شکل (۳): اثر پارامتر پیرسازی بر رفتار پیرسختی سوپرآلیاژ Ni-Span C 902: (الف): نورد سرد نشده و (ب): ۵۰ درصد نورد سرد شده

۶- مراجع

[۱] ا. جعفری، س. م. عباسی، م. مرکباتی و م. سیف‌اللهی، "تاثیر نوع فرآیند ذوب مجدد بر ریزساختار و سختی سوپرآلیاژ پایه نیکل ریختگی IN100"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۵۵-۶۶.

[2] W. S. Mc Cain, "Mechanical and Physical Properties of Invar and Invar-Type Alloys", Battelle Memorial Institute, 1965.

[3] A. A. Tavassoli, "Effect of Percipitation on Physical Properties of Ni-Span-C", Scripta Metallurgica, Vol. 7, 1973, pp. 354-350.

[4] M. J. Donachie & S. J. Donachie, "Superalloy: A Technical Guide", Second Edition, ASM International, 2002.

[۵] م. مرکباتی، س. م. عباسی، ن. احسانی، ح. بدری و س. م. قاضی میرسعید، "بررسی تاثیر نورد سرد روی سینتیک پیرسازی یک فولاد پرآلیاژ محتوی 10Cr-10Ni-5Mo-2Cu-1Ti"، سمپوزیوم فولاد، بندرعباس، ۱۳۸۶.

[۶] ع. مرتضایی و م. شمعیان، "اثر عملیات حرارتی پیرسازی بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۱۸"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۲۰۵-۲۱۳.

[7] Y. Shimanuki & H. Doi, "Dislocation- γ Interaction and Age-Hardening Mechanism in a Ni-Base Superalloy, Udimet 520", Trans. JIM, Vol. 16, pp. 123-131, 1975.

[8] M. J. Zhao, Z. F. Guo, H. Liang & L. J. Rong, "Effect of Boron on The Microstructure, Mechanical Properties And Hydrogen Performance In A Modified A286", Materials Science and Engineering, Vol. 527A, pp. 5844-5851, 2010.

[9] K. Kusabiraki, E. Amada, T. Ooka and S. Sajl, "Epsilon and Eta Precipitation in an Fe-38Ni-13Co-4.7Nb-1.5Ti-0.4Si Superalloy", ISIJ International, Vol. 37, No. I, pp. 80-86, 1997.

[10] H. Mirzadeh & A. Najafzadeh, "Aging kinetics of 17-4 PH stainless steel", Materials Chemistry and Physics, Vol. 116, pp. 119-124, 2009.

احتمالاً رسیدن شعاع ذرات به شعاع بحرانی، حداکثر درصد نسبی سخت شدن حاصل شده است. برای این نمونه پس از رسیدن به پیک، درصد نسبی سخت شدن در اثر فوق پیری با افزایش بیشتر پارامتر پیرسازی کاهش می‌یابد. این پدیده فوق-پیری می‌تواند به درشت شدن رسوبات فاز γ و رسوب گذاری فاز صفحه‌ای مرتبط باشد. در ادامه با افزایش پارامتر پیرسازی کاهش مشاهده شده در سختی، افزایش می‌یابد. این رفتار مشاهده شده در تطابق کامل با نتایج بدست آمده از مطالعات انجام شده [۳-۱۴] می‌باشد. حداکثر سختی برای نمونه‌های نورد سرد نشده در محدوده پارامتر پیرسازی ۲۰-۲۲ بدست آمده است. اما برای نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده حداکثر سختی در محدوده ۲۱-۱۹ بدست آمده است. بنابراین با انجام کار سرد در دماها و زمان‌های کمتری پیک سختی حاصل شده است.

۵- نتیجه گیری

۱- تاثیر دما و زمان پیرسازی بعنوان پارامتر پیرسازی روی رفتار استحکام دهی آلیاژ توسط روش شبکه عصبی مصنوعی (ANNs) شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفت.

۲- شبکه طراحی شده دارای عملکرد مناسبی می‌باشد و نتایج حاصل از آن دارای تطابق بالایی با داده‌های تجربی است.

۳- در پارامترهای پیرسازی کم تا مقدار برابر با ۱۵، تغییرات قابل ملاحظه درصد نسبی سخت شدن برای نمونه نورد سرد نشده و ۵۰ درصد نورد سرد شده مشاهده نشد. برای نمونه نورد سرد نشده در محدوده پارامتر پیرسازی ۱۵-۲۲ و برای نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده در محدوده پارامتر پیرسازی ۲۰-۱۵، رسوب گذاری فاز γ منجر به افزایش سختی شد.

۴- در نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده در پارامتر پیرسازی برابر با ۲۱ حداکثر درصد نسبی سخت شدن حاصل شد.

۵- حداکثر سختی برای نمونه نورد سرد نشده با پیرسازی در دمای 750°C به مدت 6×10^4 ثانیه و برای نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده در دمای 650°C به مدت 10^5 ثانیه بدست آمد.

[17] H. Mirzadeh & A. Najafizadeh, "Correlation Between Processing Parameters and Strain-induced Martensitic Transformation in Cold Worked AISI 301 Stainless Steel", *Materials Characterization*, Vol. 59, pp. 1650 – 1654, 2008.

۷- پی نوشت

- [1] Vacume induction melting
- [2] Electro-slag remelting
- [3] Training
- [4] Validation
- [5] Testing
- [6] Feed-forward network
- [7] Hidden layer
- [8] Feedback loop
- [9] Neuron (Processing element)
- [10] Network Architecture
- [11] Training algorithm (learning rule)
- [12] Back-propagation
- [13] Overtrained (grandmothered) network
- [14] Memorizing
- [15] Epoch
- [16] Early stopping technique
- [17] Overfitting

[11] M. S. Ozerdem & S. Kolukisa, "Artificial Neural Network approach to predict mechanical properties of hot rolled, nonresulfurized, AISI 10xx series carbon steel bars", *J. Mater. Process. Technol*, Vol. 199, No. 1, pp. 437–439, 2008.

[12] S. Taghizadeh, A. Safarian, S. Jalali & A. Salimiasl, "Developing a model for hardness prediction in water-quenched and tempered AISI 1045 steel through an artificial neural network", *Mater. Des*, Vol. 51, pp. 530–535, 2013.

[13] "Ni-Span C Alloy 902", *Special Metals*, Publication Number SMC-086, 2004.

[14] A. A. Tavassoli & A. P. Miodownik, "The Effect of Variations in Chromium Structure of Modified Invar- Type Alloys", *Metal Science*, Vol. 9, pp. 493-495, 1975.

[15] M. Ward, "Constant Modulus Alloy for Elastic Elements", *Production Engineering*, Vol. 27, pp. 135, 1956.

[16] N. Wan, W. Xiong & J. Suo, "Mathematical Model for Tempering Time Effect on Quenched Steel Based on Hollomon Parameter", *J. Mater. Sci. Technol*, Vol. 21, No.6, pp. 803-806, 2005.

Archive