

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Computer simulation for prediction of transformation percent and hardness in quenching heat treatment of steels

Abstract

In this research, a 2-dimesional finite element thermal model with axis symmetry was prepared in ANSYS software according to jominy end-quench test. By using thermal history of different points of jominy sample, the percent of formed phases and the hardness of steel after quenching were predicted. To gain this purpose the points of CCT diagram of the selected steel, represent the amounts of ferrite, pearlite and bainite transformation, were identified. Afterwards, an algorithm to find the intersection of cooling curves and CCT diagram was developed. According to the intersections, phase percent and hardness were calculated. The time lasts to sample cools down from 800 to 500 °C is called $t_{8/5}$. Since each point of jominy sample has a specific hardness and $t_{8/5}$, this time can be used as a gauge to predict the hardness of each point of an industrial work piece with similar material. If CCT diagram of a specific steel is available, this developed model could be used for the prediction of phase change percent and the hardness of different steel work piece after quenching.

Key words: simulation, heat treatment, Jominy end-quench test, CCT diagram.

شبیه‌سازی کامپیوتری تعیین درصد تغییر حالت و سختی در

عملیات حرارتی کوئنچ فولادها

چکیده

در پژوهش حاضر ابتدا یک مدل حرارتی به روش المان محدود در مختصات دو بعدی با تقارن محوری بر اساس آزمایش استاندارد جامینی در نرم افزار ANSYS تهیه و در مرحله بعد با استفاده از تاریخچه حرارتی نقاط مختلف نمونه جامینی، درصد فازهای تشکیل شده و سختی حاصل از کوئنچ فولاد پیش‌بینی گردید. برای این منظور ابتدا نقاط لازم از دیاگرام CCT فولاد مورد نظر، که بیانگر درصد پیشرفت استحاله‌های فریت، پرلیت و بینیت بود، مشخص و سپس الگوریتمی برای بررسی شرایط برخورد منحنی‌های سرد شدن با دیاگرام CCT فولاد توسعه داده شد و بر اساس محل برخورد‌های بدست آمده، محاسبات فازی و سختی انجام پذیرفت. با توجه به معلوم بودن سختی هر نقطه از نمونه جامینی و امکان محاسبه‌ی مدت زمان قرارگیری در محدوده دمائی ۵۰۰ تا ۸۰۰ °C (زمان $t_{8/5}$) برای نقاط مختلف، مقادیر $t_{8/5}$ به‌دست آمده را می‌توان به عنوان معیاری برای تعیین سختی نقاط مختلف هر قطعه صنعتی از جنس فولاد فوق مورد استفاده قرار داد. از مدل شبیه‌سازی توسعه داده شده‌ی حاضر می‌توان برای پیش‌بینی درصد تغییر فاز و سختی حاصل از کوئنچ قطعات صنعتی فولادی (در صورت در اختیار بودن دیاگرام CCT) استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، عملیات حرارتی، آزمایش جامینی، نمودار CCT.

مقدمه

اگرچه شبیه سازی فرآیند عملیات حرارتی با چالش های بسیاری روبروست ولی می تواند اطلاعات ارزشمندی از درصد فازها و ساختارهای نهایی و سختی هر نقطه و همچنین تنش های پسماند حرارتی و متالورژیکی را فراهم آورد. آزمایش سختی پذیری جامینی مثالی از عملیات حرارتی فولادهاست که به دلیل تکرارپذیری و قابلیت بسط نتایج حاصل از آن کاربرد گسترده ای دارد. در این آزمایش نمونه ای استوانه ای از فولادی آستنیت شده، از یک انتها با پاشش آب با دبی مشخص سرد می شود. بر این اساس نقاط مختلف نمونه در راستای طول، سرعت سرد شدن متفاوتی را تجربه می کنند و در نتیجه سختی متفاوتی خواهند داشت. از آنجا که در ترکیب شیمیای ثابت، سختی فولاد تنها وابسته به سرعت سرد شدن است، هر نقطه از یک نمونه ای عملیات حرارتی شده را می توان به نقطه ای روی قطعه ای جامینی با همان جنس مربوط دانست که سرعت سرد شدن و در نتیجه سختی یکسانی دارند. بر این اساس از نمودارهای مرجعی استفاده میشود و سعی می گردد تا با تخمین سرعت سرد شدن هر نقطه از قطعه، سختی معادلی برای آن حدس زده شود (Rajan, Sharma, & Sharma, 2011).

به طور کلی تحلیل حرارتی - سیالاتی آزمایش جامینی خصوصاً در نقطه ای برخورد فواره با نمونه بسیار پیچیده می باشد. تبخیر آب در لحظه ای اول برخورد با نمونه با دمای بالا و دیگر مراحل سرد شدن از طریق پاشش آب به انتهای نمونه، عملاً تخمین ضریب انتقال حرارت^۱ در اثر جابجایی^۲ را با دشواری های بسیاری همراه ساخته است. تخمین ضریب انتقال نه تنها در مورد آزمایش جامینی بلکه در مورد اکثر آنالیزهای حرارتی از چالش های جدی به حساب می آید. این ضریب نه تنها به دما وابسته می باشد بلکه برای نقاط مختلف نمونه نیز مقادیری متفاوت خواهد بود. پژوهشگران در گذشته با استفاده از روند تغییرات دمایی نقاط مختلف و بر اساس روش هایی نظیر تخمین معکوس^۳ سعی نموده اند تا به تقریبی از این ضریب دست یابند (Chen, Weng, & Lin, 1999). با توجه به پیچیدگی های موجود در زمینه تخمین ضریب انتقال حرارت، در اکثر پژوهش ها تنها یک مقدار معادل برای ضریب انتقال حرارت پیشنهاد می شود که در مورد آزمایش سختی پذیری جامینی نیز مقدار معادل $15000 \text{ W/m}^2\text{K}$ برای سطح زیرین نمونه پیشنهاد گردیده است (Masson et al, 2002). توجه به این نکته ضروری است که انتقال حرارت در آزمایش سختی پذیری جامینی عمدتاً از طریق سطح زیرین نمونه صورت می پذیرد و انتقال حرارت از سطح جانبی نمونه نقش چندانی بر سرد شدن نمونه ندارد. انتقال حرارت از سطح جانبی از طریق تابش^۴ و جابجایی در اثر تماس نمونه با هوا است که ضریب انتقال حرارت برای سطح در تماس با هوا تنها در حدود $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ و ضریب انتقال حرارت جایگزین به جای تابش نیز برابر با $80 \text{ W/m}^2\text{K}$ تقریب زده شده است (Masson et al, 2002). محاسبات مربوط به استحاله های متالورژیکی از دیگر چالش های پیش رو در شبیه سازی عملیات حرارتی فولادهاست. پژوهشگران عمدتاً با حل معادلات اورامی (Avrami) به طور همزمان، به تعیین درصد پیشرفت استحاله در حین عملیات حرارتی پرداخته اند (Serajzadeh, 2003; Serajzadeh, 2004; Serajzadeh, 2004). علاوه بر این، مدت زمانی که طول می کشد تا دمای نقطه ای خاص از یک قطعه از 800°C به 500°C (زمان $t_{8/5}$) برسد نیز می تواند به عنوان معیاری برای تعیین سختی قطعه ای فولادی به کار رود (Smoljan, 2005). با نسبت دادن $t_{8/5}$ هر نقطه از قطعه به سختی به دست آمده برای آن می توان با در دسترس بودن تغییرات دمایی، به تخمین سختی پرداخت.

¹ - Heat transfer coefficient

² - Convection

³ - Inverse estimation

⁴ - Radiation

در این پژوهش با فرض ثابت ماندن خواص فیزیکی فولاد در اثر استحاله، ابتدا به حل معادلات حرارت حاکم بر آزمایش سختی - پذیری جامینی پرداخته شد و سپس بر اساس نمودار CCT^۵ موجود برای فولاد و بدون نیاز به حل معادلات اورامی، الگوریتمی برای تعیین درصد فازها، ساختارها و سختی نهایی بسط داده شد.

روش پژوهش

ماده

در پژوهش حاضر، فولاد AISI 1045) ck45 DIN (که از فولادهای پرکاربرد با قابلیت عملیات حرارتی است انتخاب گردید. نمودار CCT این فولاد در شکل ۱ نشان داده شده است. خواص فیزیکی وابسته به دمای این فولاد نیز از مرجع (ASM INTERNATIONAL Handbook Committee, 1990) استخراج گردید.

حل معادلات

برای حل معادلات حرارت از نرم‌افزار ANSYS 10 که به روش اجزاء محدود^۶ به حل معادلات دیفرانسیل می‌پردازد، استفاده گردید. با توجه به شکل استوانه‌ای نمونه جامینی حل به صورت دوبعدی و با در نظر گرفتن تقارن محوری^۷ صورت پذیرفت.

بارگذاری و شرایط مرزی

دمای اولیه نمونه با توجه به دمای آستنیت کردن فولاد ck45، برابر ۸۶۰ °C انتخاب گردید. ضریب انتقال حرارت برای کف نمونه ثابت و برابر ۱۵۰۰۰ W/m².K فرض شد و از تأثیر جابجایی از طریق هوا روی سطح جانبی نمونه صرف نظر گردید. برای تأثیر تابش از سطح جانبی نیز، از بارگذاری به صورت جابجایی و ضریب انتقال حرارت ۸۰ W/m².K استفاده شد.

تعیین درصد نهایی فازها و ساختارها

اعداد نشان داده شده در محل برخورد نمودار سرد شدن با خطوط فریت، پرلیت و بینیت که روی شکل ۱ مشخص شده‌اند، می‌توانند بیانگر تخمینی از درصد پیشرفت استحاله باشند و با توجه به درصد آستنیت مصرف شده در استحاله‌های قبل، می‌توان دریافت که تا رسیدن به نقطه‌ی برخورد، استحاله تا چه حدی پیشرفت داشته است. بر این اساس با یک نتیجه‌گیری می‌توان گفت که نقطه برخوردی بین دو درصد پیشرفت استحاله‌ی متفاوت، پیشرفتی متناسب با فاصله از دو نقطه‌ی مجاور را داراست. بدین ترتیب می‌توان با به دست آوردن فاصله‌ی نقطه برخورد از دو نقطه مجاور (روی خطوط فریت، پرلیت و بینیت) و با فرض اینکه درصد پیشرفت استحاله بین دو نقطه به صورت خطی تغییر می‌کند، به درصد پیشرفت استحاله در یک مسیر سرد شدن خاص دست یافت. برای این هدف پس از پایان حل میدان گرمایی، برنامه‌نویسی در محیط APDL^۸ انجام و نقطه‌ی برخورد نمودار سرد شدن با خطوط فریت، پرلیت و بینیت تعیین شد.

تعیین سختی

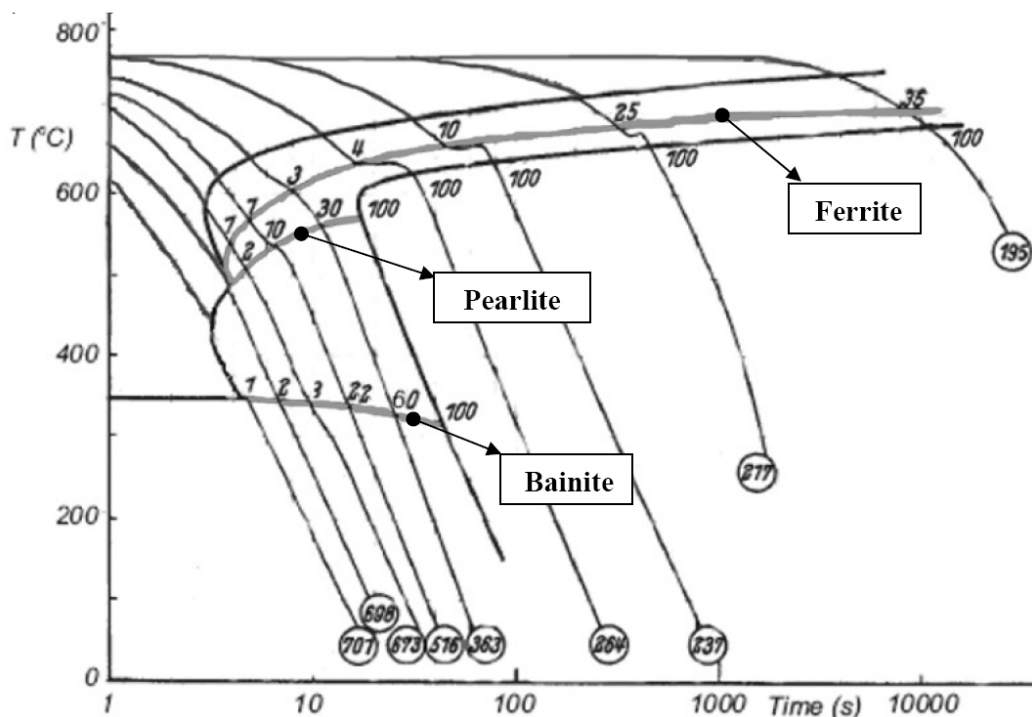
در صورت در دسترس بودن درصد هر فاز یا ساختار و سختی مربوط به آن، می‌توان سختی نهایی هر نقطه از فولاد عملیات حرارتی شده را با رابطه ۱ نشان داد (Smoljan, 2005):

^۵ - Continuous Cooling Transformation

^۶ - Finite Element Method

^۷ - Axis symmetry

^۸ - Ansys Parametric Design Language



شکل ۱- نمودار CCT فولاد ck45 (Wever, & Rose, 1961).

$$Haedness = \frac{\%F H_F + \%P H_P + \%B H_B + \%M H_M}{100} \quad (1)$$

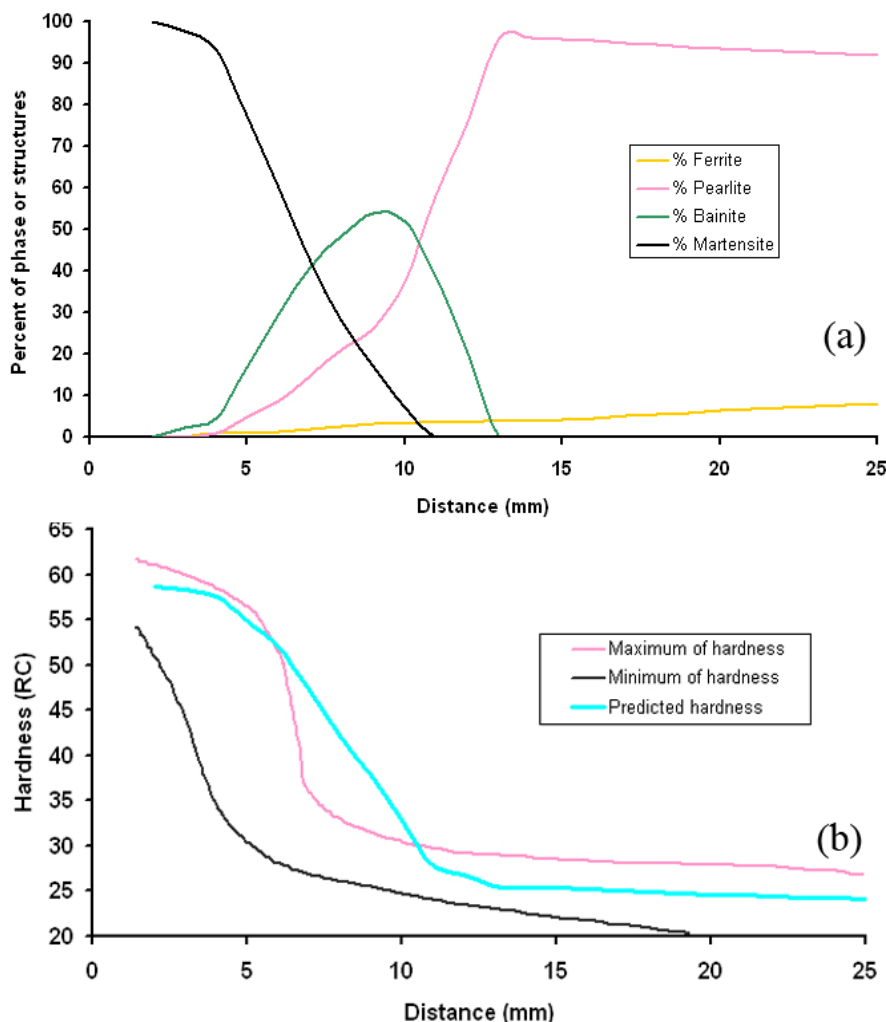
که در این رابطه $\%F$ ، $\%P$ ، $\%B$ و $\%M$ به ترتیب نشان دهنده درصد فازها و ساختارهای فریت، پرلیت، بینیت و مارتنزیت و H_F ، H_P ، H_B و H_M به ترتیب بیانگر سختی فازها و ساختارهای فریت، پرلیت، بینیت و مارتنزیت است. در شکل ۱ و برای هر مسیر سرد شدن متفاوت، سختی ویکرز نهایی درون دایره‌هایی نشان داده شده است. با استفاده از رابطه ۱ و با توجه به مشخص بودن درصد فازها در هر مسیر سرد شدن، می‌توان مقادیر تقریبی H_F ، H_P ، H_B و H_M را به ترتیب با ۷۲ HV، ۲۷۰ HV، ۳۱۰ HV و ۷۰۴ HV جایگزین نمود.

 $t_{8/5}$

با توجه به موجود بودن نتایج حل حرارتی می‌توان $t_{8/5}$ را برای هر نقطه به‌دست آورد و آن را به سختی هر نقطه ربط داد. در عمل پس از انجام آزمایش سختی‌پذیری جامینی، نمونه به اندازه‌ی 4 mm سنگ زده شده و سختی‌سنجی صورت می‌گیرد. نمودار تغییرات سختی استاندارد برای نمونه جامینی در مراجع موجود بوده و می‌تواند به‌عنوان معیاری از صحت شبیه‌سازی صورت پذیرفته مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس الگوریتم شرح داده شده و برای نقاطی به فاصله‌ی 4 mm از سطح به تعیین درصد فازها و ساختارها و همچنین میزان سختی پرداخته شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

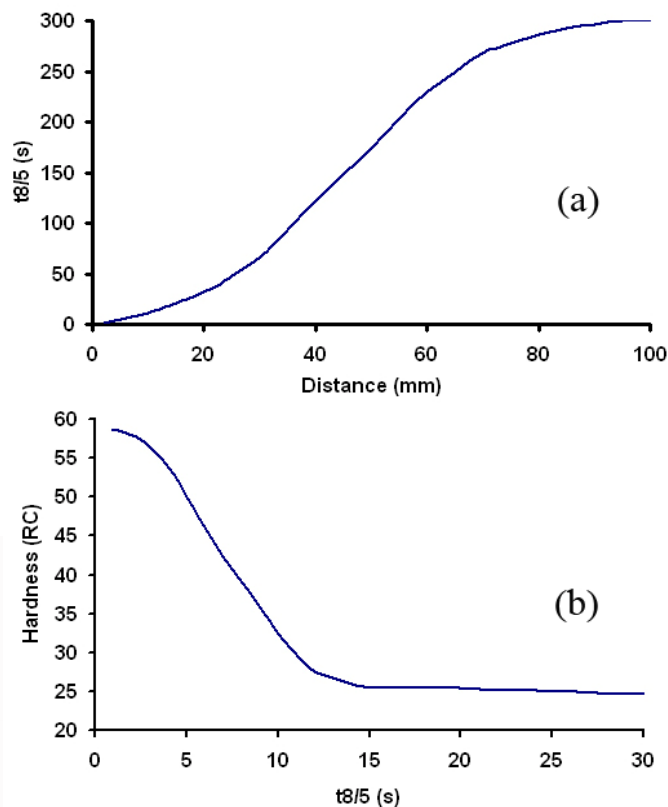
پیش‌بینی درصد فازها و ساختارها بر حسب فاصله از محل سرد شدن نمونه جامینی در شکل ۲-ا نشان داده شده است. بر این اساس می‌توان گفت که استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت تنها در فواصل ابتدای 1 cm رخ می‌دهد و بعد از این فاصله ساختار



شکل ۲- (a) تغییرات درصد فازها و ساختارها (b) سختی پیش‌بینی شده در مقایسه با منحنی استاندارد جамینی، برای فولاد ck45 و بر حسب فاصله از انتهای نمونه جامینی.

عمدتاً فریتی - پرلیتی خواهد بود. بینیت نیز تنها در فواصل ۲/۵ تا ۱۲/۵ cm از محل سرد شدن دیده می‌شود و بیشینه مقدار بینیت تشکیل شده در فاصله‌ی ۹ cm به‌دست می‌آید. شکل ۲-b تغییرات سختی پیش‌بینی شده بر اساس درصد فاز و ساختار را در مقایسه با منحنی استاندارد جامینی برای فولاد ck45 نشان می‌دهد و می‌تواند معیاری از صحت ایده‌ی بسط داده شده در این پژوهش باشد. همان‌طور که از روی شکل نیز مشخص است نتایج پیش‌بینی سختی، تنها در ناحیه‌ی محدودی از منحنی استاندارد جامینی انحراف نشان می‌دهد و در اکثر قسمت‌ها مطابقت قابل قبولی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و منحنی استاندارد جامینی وجود دارد.

همان‌طور که قبلاً بدان اشاره شد، زمان مشخصه‌ی $t_{8/5}$ نیز می‌تواند به‌عنوان معیاری برای پیش‌بینی سختی مورد استفاده قرار گیرد. تغییرات زمان مشخصه $t_{8/5}$ بر حسب فاصله از انتهای نمونه جامینی و همچنین ارتباط آن با سختی پیش‌بینی شده، به ترتیب در شکل‌های ۳-a و ۳-b نشان داده شده‌اند. در عمل با در دست داشتن تخمینی از $t_{8/5}$ برای نقطه‌ای از فولاد ck45



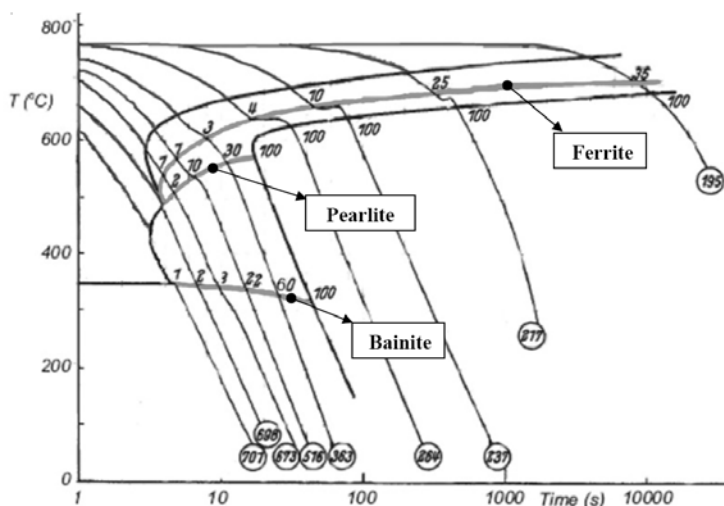
شکل ۳- (a) زمان مشخصه $t_{8/5}$ بر حسب فاصله از انتهای نمونه جамینی و (b) ارتباط زمان مشخصه $t_{8/5}$ به سختی برای فولاد ck45.

عملیات حرارتی شده و با استفاده از شکل ۳-b می توان با دقتی قابل قبول، به پیش بینی سختی پرداخت.

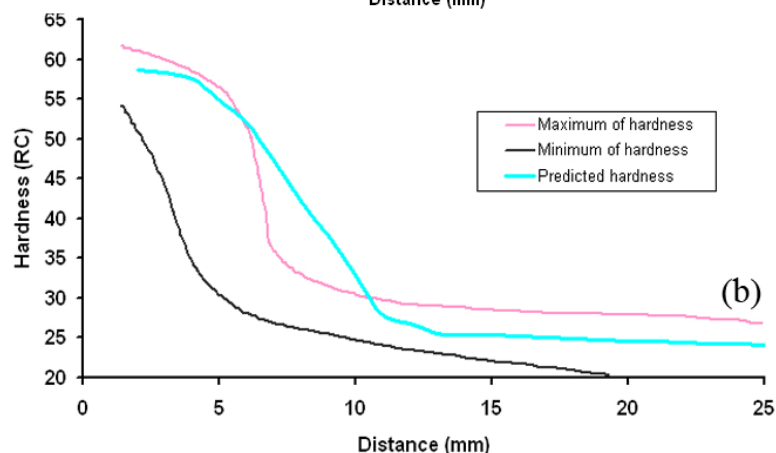
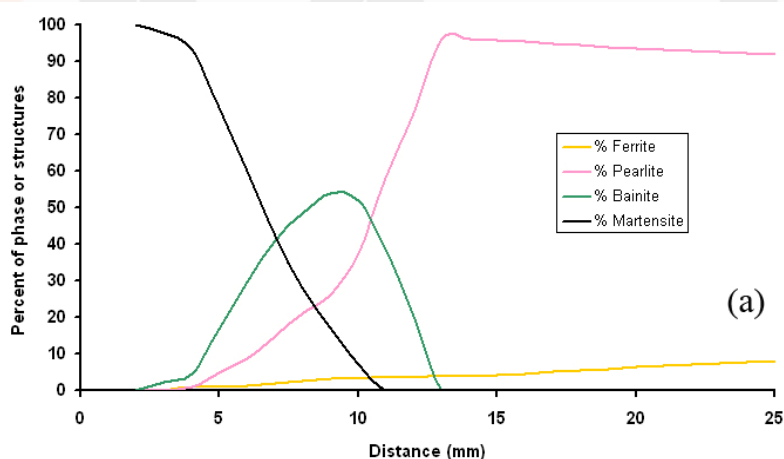
نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه سازی آزمایش سختی پذیری جамینی برای پیش بینی درصد فازها و ساختارها و به تبع آن سختی، تطابق قابل قبولی را با نتایج استاندارد سختی موجود نشان می دهد. به طور کلی می توان گفت که با در دست بودن نمودار CCT، روش ارائه شده برای تعیین سختی هر فولادی قابل کاربرد است. همچنین با معتبر بودن شرایط مرزی شبیه سازی، می توان زمان مشخصه $t_{8/5}$ را برای هر نقطه با سختی متناظر تعیین و برای تخمین سختی نقاط مختلف نمونه عملیات حرارتی به کار بست.

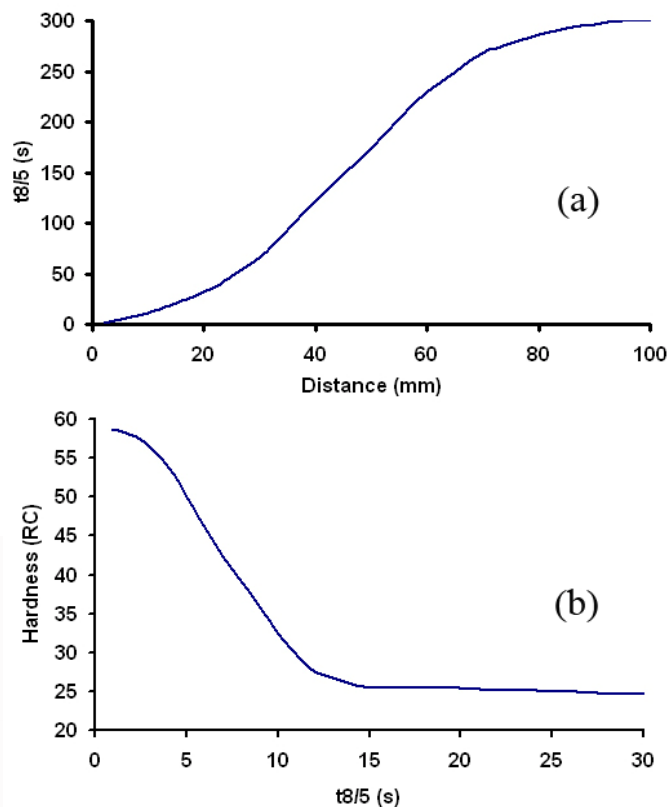
شکل ها و نمودارها



شکل ۱- نمودار CCT فولاد CK45.



شکل ۲- (a) تغییرات درصد فازها و ساختارها (b) سختی پیش بینی شده در مقایسه با منحنی استاندارد جامینی، برای فولاد CK45 و بر حسب فاصله از انتهای نمونه جامینی.



شکل ۳- (a) زمان مشخصه $t_{8/5}$ بر حسب فاصله از انتهای نمونه جамینی و (b) ارتباط زمان مشخصه $t_{8/5}$ به سختی برای فولاد CK45.

Conference 2014

منابع

ASM INTERNATIONAL Handbook Committee, (1990), Metals Handbook, volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Ohio.

Chen, S. G., Weng, C., & Lin, J., (1999), "Inverse estimation of transient temperature distribution in the end quenching test", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 86, Pp. 257–263.

Masson, P. L., Loulou, T., Artioukhine, E., Rogeon, P., Carron, D., & Quemener, J. J., (2002), "A numerical study for the estimation of a convection heat transfer coefficient during a metallurgical "Jominy end-quench" test", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 41, Pp. 517–527.

Rajan, T. V., Sharma, C. P., & Sharma, A., (2011), HEAT TREATMENT: Principles and Techniques, (second edition), New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd.

Serajzadeh, S., (2003), "Prediction of temperature distribution and phase transformation on the run-out table in the process of hot strip rolling", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 27, Pp. 861–875.

Serajzadeh, S., (2004), "A mathematical model for prediction of austenite phase transformation", *Materials Letters*, Vol. 58, Pp. 1597–1601.

Serajzadeh, S., (2004), "Modelling of temperature history and phase transformations during cooling of steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, Pp. 311–317.

Smoljan, B., (2005), "Prediction of mechanical properties and microstructure distribution of quenched and tempered steel shaft", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, Pp. 393–397.

Wever, F., & Rose, A., (1961), Atlas zur Wärmebehandlung von Stähle, I Zeit Temperatur Umwandlungs Schaubilder, Düsseldorf, Verlag Stahl Eisen MBH.