

شبیه‌سازی حرارتی کوئنچ و پیش‌بینی سختی فولاد CK45

محمد خدائی

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی

khodai1358@yahoo.com

چکیده

خواص مکانیکی فولادها علاوه بر آنالیز شیمیایی به مقدار قابل توجهی به عملیات حرارتی انجام شده روی فولاد بستگی دارد و فرآیندهای مختلف حرارتی باعث ایجاد طیف وسیعی از خواص در فولادها خواهند شد. دو پدیده انتقال حرارت و نفوذ در قطعات فولادی تعیین‌کننده ریزساختارهای حاصل در اثر عملیات حرارتی می‌باشند. با دانستن نرخ سرد شدن فولاد و نمودار CCT آن، می‌توان ریزساختار حاصل را در اثر سرد شدن پیوسته فولاد از دمای آستنیت به پیش‌بینی نمود. از طرفی بدست آوردن نرخ سرد شدن قسمت‌های داخلی قطعات کار مشکلی می‌باشد. در پژوهش حاضر نرخ سرد شدن نقاط داخلی یک مکعب فولادی از جنس CK45 از طریق شبیه‌سازی معادلات انتقال حرارت به روش اختلاف محدود محاسبه شده است. سپس نمودارهای حاصل بر نمودار CCT فولاد انطباق داده شده و ریزساختار هر نقطه پیش‌بینی شده است. پس از انجام عملیات حرارتی بر فولاد، قطعه برش داده شده و سختی نقاط مورد بررسی، اندازه‌گیری شده است که نتایج سختی سنجی تأییدی بر صحت محاسبات شبیه‌سازی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

فولاد CK45، نمودار CCT، شبیه‌سازی انتقال حرارت، روش اختلاف محدود.

۱- مقدمه

شدن نسبت به زمان هر نقطه از قطعه می‌توان سختی آن نقاط را پیش‌بینی نمود. در واقع به محاسبه نرخ سرد شدن هر نقطه از قطعه و داشتن منحنی CCT آن ماده می‌توان سختی و حتی ریزساختار آن را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرد [۱ و ۲].

نرخ سرد شدن یک نقطه از قطعه به پارامترهایی مانند دمای اولیه فلز، ظرفیت گرمایی فلز، ضریب هدایت حرارتی فلز، ضخامت فلز (که شامل فاصله نقطه از سطح و گرمای ذخیره شده در آن منطقه است) و دما و ضریب هدایت حرارتی و حجم و برخی دیگر پارامترهای محیط خنک‌کننده بستگی دارد.

ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی قطعات فولادی در اثر عملیات حرارتی به نرخ سرد شدن قطعه بستگی دارد. با توجه به این که نقاط مختلف قطعه فواصل مختلفی از سطح قطعه دارند، بنابراین نرخ سرد شدن نقاط مختلف قطعه متفاوت بوده و در اثر عملیات حرارتی ممکن است ریزساختارها و سختی‌های متفاوتی در قسمت‌های مختلف قطعه حاصل شود (در صورتی که ضخامت قطعه از حد معینی بیشتر باشد). در مورد فولادها با داشتن نمودار دگرگونی سرد شدن پیوسته (CCT) و نمودار سرد

۲- روش تحقیق

۲-۱- تحلیل حرارتی قطعه به روش اختلاف محدود

معادلات اختلاف محدود برای رفتار گذرا در سیستم‌های سه بعدی با در نظر گرفتن سرعت انباشت انرژی حرارتی در معادله (۱) (انتقال حرارت هدایتی در سه بعد در شرایط پایا) بدست می‌آیند. بنابراین برای شبکه‌بندی با اندازه $\Delta x \Delta y \Delta z$ موازنه انرژی برای یک المان داخلی که هیچ گرمایی در آن تولید نمی‌شود منجر به معادله (۲) می‌گردد [۳ و ۴].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$-k \Delta x \Delta y \frac{T_{m,n,o}^p - T_{m,n,o+1}^p}{\Delta z} - k \Delta x \Delta z \frac{T_{m,n,o}^p - T_{m,n+1,o}^p}{\Delta y} - k \Delta y \Delta z \frac{T_{m,n,o}^p - T_{m+1,n,o}^p}{\Delta x} - k \Delta x \Delta y \frac{T_{m,n,o}^p - T_{m,n,o-1}^p}{\Delta z} \quad (2)$$

$$-k \Delta x \Delta z \frac{T_{m,n,o}^p - T_{m,n-1,o}^p}{\Delta y} - k \Delta y \Delta z \frac{T_{m,n,o}^p - T_{m-1,n,o}^p}{\Delta x} = \rho \Delta x \Delta y \Delta z C_p \frac{T_{m,n,o}^{p+1} - T_{m,n,o}^p}{\Delta t}$$

و برای یک شبکه با المان‌های مکعب مربعی با $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ معادله (۳) بدست می‌آید.

$$T_{m,n,o}^{p+1} = T_{m,n,o}^p + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^3} \left(T_{m,n,o+1}^p + T_{m,n,o-1}^p + T_{m,n+1,o}^p + T_{m,n-1,o}^p + T_{m+1,n,o}^p + T_{m-1,n,o}^p - 6T_{m,n,o}^p \right) \quad (3)$$

منظور از آلفا، ضریب نفوذ حرارتی $\left(\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \right)$ می‌باشد.

به همین صورت در گره سطحی، برای سطحی که در تماس با سیال است به جای ترم هدایتی از ترم همرفت $[+hA(T_\infty - T_0)]$ استفاده می‌شود [۳ و ۴].

در این تحقیق انتقال حرارت به روش‌های جابجایی و همرفت در یک مکعب مربع فولادی با طول ضلع ۱۰ سانتی‌متر و با دمای اولیه ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد (که در آب کونچ می‌شود) به روش اختلاف محدود و توسط زبان برنامه‌نویسی MATLAB محاسبه گردیده‌است. مشخصات فولاد (CK45) طبق جدول (۱) مورد استفاده قرار گرفته‌است.

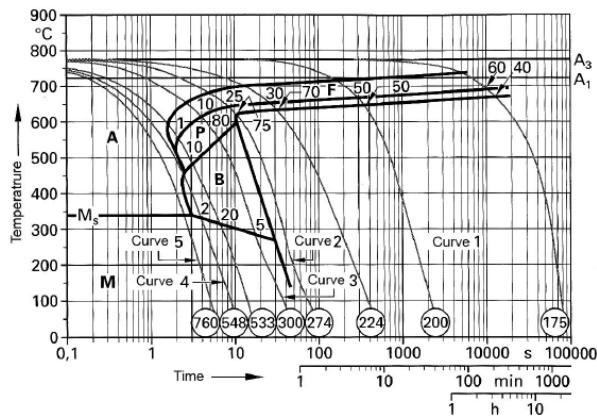
در واقع می‌توان آهنگ سرد شدن یک قطعه فولاد تحت تأثیر دو پارامتر مهم تقسیم‌بندی کرد. یکی انتقال حرارت از داخل به سطح نمونه فولادی و دیگر انتقال حرارت از سطح قطعه توسط سرد کننده. توانایی انتقال حرارت یک فولاد توسط پارامتر نفوذ حرارتی یا نسبت هدایت حرارتی به گرمای ویژه حجمی آن مشخص می‌شود، نفوذ حرارتی محصولات دگرگونی آستنیت با کاهش دما افزایش می‌یابد. برای یک محیط سرد کننده سریع نفوذ حرارتی مشخص کننده‌ی توزیع دما در ناحیه سرد شونده است و آهنگهای سرد شدن آهسته‌تر در نقاط دور از سطح و نزدیک به مرکز زمان بیشتری برای دگرگونی نفوذی فراهم می‌کند. از آنجا که عملاً امکان کنترل خواص حرارتی در فولادها بسیار کم است، مهمترین روش کنترل آهنگ سرد شدن یک قطعه با انتخاب صحیح محیط سردشونده مناسب است. انتقال حرارت در فصل مشترک قطعه فولادی با محیط سردشونده آن، مسئله نسبتاً پیچیده است. این پدیده بستگی به شدت تشعشع حرارت از سطح فولاد و جریانهای جابجایی در داخل محیط سرد کننده دارد این امر باعث دور کردن حرارت از فصل مشترک فلز و محیط می‌شود. در نظر گرفتن تمام عوامل فوق توسط محاسبات دستی برای قطعات بزرگ و پیچیده مشکل و تا حدی غیر ممکن می‌باشد [۳].

استفاده از محاسبات شبیه‌سازی که به روش‌های متفاوتی مانند روش اختلاف محدود^۱ و روش حجم محدود^۲ و روش المان محدود^۳ انجام می‌شود، می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های تولید ناشی از سعی و خطا و پیش‌بینی بسیاری پدیده‌های متالورژیکی شود. در تحقیق حاضر نرخ سرد شدن قطعات فولادی در اثر کونچ توسط نرم‌افزار محاسباتی و برنامه‌نویسی MATLAB برنامه‌های به روش (اختلاف محدود) FDM نوشته شده و فرآیند شبیه‌سازی و سپس توسط نتایج حاصل، سختی نقاط مختلف قطعه پیش‌بینی شده‌است [۴، ۵ و ۶]. این نرم‌افزار صرفاً یک نرم‌افزار محاسباتی بوده که با تعریف معادلات انتقال حرارت و شرایط مرزی برای آن، می‌توان مسائل مختلف مهندسی را شبیه‌سازی نمود.

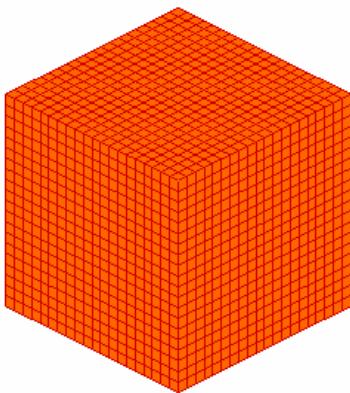
جدول (۱): شماره و آنالیز فولاد مورد آزمایش.

شماره استاندارد	مشخصه DIN	C%	Si%	Mn%	P %≤	S %≤	Cr%	شماره SAE
۱/۱۱۹۱	CK45	۰/۴	۰/۵۰ ۰/۸۰	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	≤ ۰/۴	۱۰۴۵

سختی آنها بررسی شده‌است، در شکل (۳) مشاهده می‌شوند. نمودارهای دما- زمان برای نقاط مشخص شده در شکل (۴) مشاهده می‌شوند (محور زمان به‌حالت لگاریتمی نیز تبدیل شده‌است). سپس نمودار حاصل بر نمودار CCT فولاد مورد مطالعه انطباق داده شده‌است (شکل ۵).



شکل (۱): نمودار CCT برای فولاد CK45 [۷].



شکل (۲): قطعه فولادی با طول ضلع ۱۰ سانتی‌متر و مش اعمال شده بر آن.

ابعاد قطعه $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و طول هر مش ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. دمای اولیه آب نیز ۲۵ درجه سانتی‌گراد فرض شده‌است. ظرفیت گرمایی فولاد $C_p = 460 \frac{J}{Kg.k}$ و ضریب هدایت حرارتی آن $K = 30 \frac{W}{m.K}$ و دانسیته فولاد $\rho = 7800 \frac{Kg}{m^3}$ منظور شده‌است. ضریب همرفت بین سطح فولاد و آب $h = 500 \frac{W}{m^2.k}$ در نظر گرفته شده‌است (برای جابجایی آزاد). حل معادلات هدایت و همرفت به‌صورت ناپایا^۴ بوده و تغییرات دمایی مربوط به‌گذشت زمان ۴۰۰ ثانیه پس از غوطه‌وری فولاد در آب می‌باشد. در نهایت نتایج بدست آمده ترسیم با نمودارهای CCT فولاد CK45 مقایسه شده‌اند.

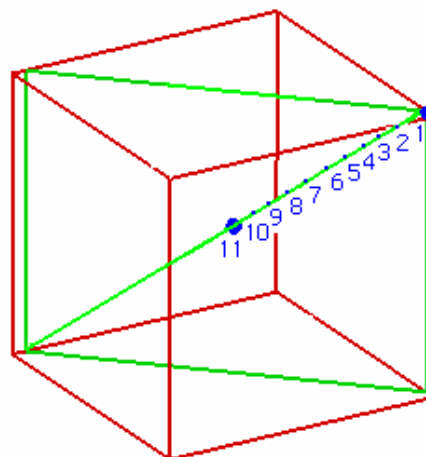
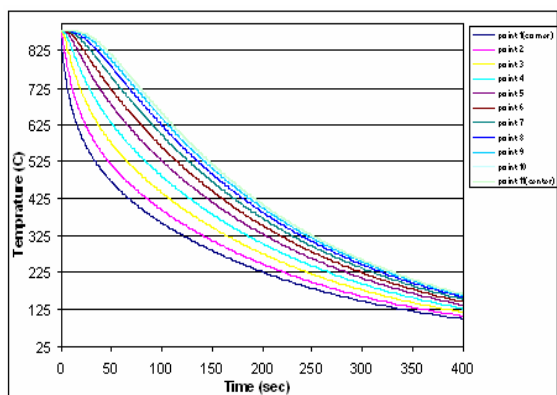
۲-۲- کوئنچ فولاد

در این قسمت پژوهش، مکعب مربع فولادی با طول ضلع ۱۰ سانتی‌متر و از جنس CK45 به‌مدت ۴ ساعت در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد آستنیت شده و سپس در وان آب کوئنچ شده‌است. ابعاد وان به‌گونه‌ای انتخاب شده که تا پایان سرد شدن فولاد، افزایش دمای قابل ملاحظه‌ای در آب ایجاد نشده‌است. سپس قطعه فولادی سخت شده از قطر اصلی برش داده شده و سختی فلز روی قطر اصلی محل برش بررسی شده‌است.

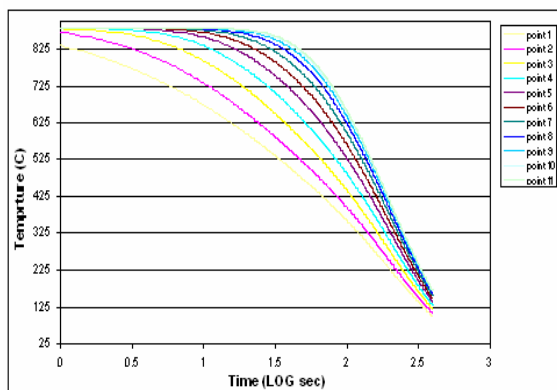
۳- نتایج و مباحث

نمودار CCT شامل منحنی‌هایی در مختصات خطی دما و لگاریتمی زمان می‌شود و پایان تغییرات آستنیت را برای هر تابع سرد کردن دما تعیین می‌کند. نمودار CCT برای فولاد ساده کربنی CK45 در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

شکل اولیه قطعه و مش (تقسیم‌بندی) اعمال شده بر آن در شکل (۲) مشاهده می‌شود. صفحه برش قطعه فولادی و نقاطی که



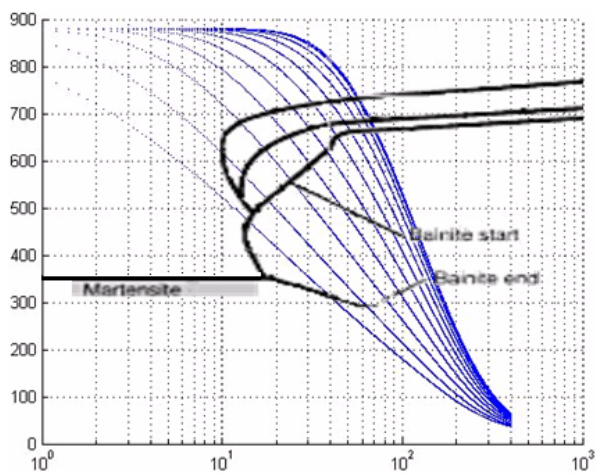
شکل (۳): صفحه برش و نقاط مورد بررسی در قطعه.



شکل (۴): نمودار دما- زمان بر مبنای ده (بالا) و لگاریتمی (پایین) برای یازده نقطه معین شده در شکل (۳).

با انطباق نمودارهای دما و زمان برای نقاط معرفی شده فولاد که توسط محاسبات شبیه سازی بدست آمده اند و نمودار CT فولاد CK45 (شکل ۵) مشاهده می شود که ریزساختار گوشه های قطعه دارای ساختار باینیتی و لایه داخلی تر دارای ریزساختار پرلیتی- باینیتی و قسمت داخلی دارای ریزساختار فریتی- پرلیتی می باشد. نتایج سختی سنجی فولاد برای یازده نقطه مورد آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است.

از شکل (۶) مشاهده می شود که سختی قطعه فولادی کوئنچ از سطح به مغز کاهش یافته است. که علت این امر کمتر بودن نرخ انتقال حرارت فلز به محیط بیرون می باشد. تطبیق خوبی بین نتایج شبیه سازی و آزمون سختی سنجی فولاد مشاهده می شود. کد شبیه سازی حاضر، مورد مناسبی برای شبیه سازی ریزساختار و سختی قطعات فولادی کوئنچ شده می باشد.



شکل (۵): انطباق منحنی های سرد شدن نقاط مورد بررسی بر نمودار CCT فولاد CK45 با ابعاد ده سانتی متر (دما بر حسب لگاریتم زمان).

[۳] د. گسکل، ترجمه سعیدرضا زارع و علی‌رضا اعلانی، "آشنایی با پدیده‌های انتقال در مهندسی مواد"، چاپ ارکان، ۱۳۸۲.

[۴] ک.ا. هافمن، اس. تی. چیانگ، ترجمه دکتر احمدرضا عظیمیان، "دینامیک سیالات محاسباتی"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۶.

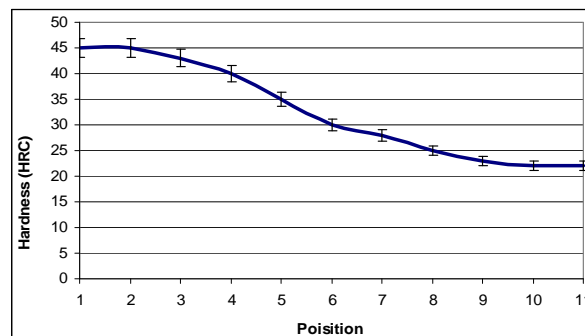
[5] A. Zehtab Yazdi, S. A. Sajjadi, S. M. Zebarjad and S. M. Moosavi Nezhad, "Prediction of Hardness at Different Points of Jominy Specimen Using Quench Factor Analysis Method", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 199, Issues 1-3, pp. 124-129, 1 April 2008.

[6] T. Reti, G. Bagyinszki, I. Felde, B. Verö and T. Bell, "Prediction of As-Quenched Hardness After Rapid Austenitization and Cooling of Surface Hardened Steels", Computational Materials Science, Vol. 15, Issue 1, pp. 101-112, May 1999.

[7] George F. Vander voort, "Atlas of Time-Temperature Diagrams for Iron and Steels", ASM International, pp. 14, 1991.

۶- پی‌نوشت

- 1- Finite Difference Method (FDM)
- 2- Finite Volume Method (FVM)
- 3- Finite Element Method (FEM)
- 4- Unsteady State



شکل (۶): نتایج سختی‌سنجی یازده نقطه معرفی شده در شکل (۳)

بر حسب HRC.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با افزایش نرخ انتقال حرارت فولاد با دمای آستنیت، احتمال تشکیل ریزساختارهای مارتنزیتی یا باینیتی افزایش می‌یابد.

۲- شبه‌سازی انتقال حرارت به روش اختلاف محدود یک روش مطمئن برای بررسی انتقال حرارت در مطالعات متالورژیکی می‌باشد.

۳- در قسمت‌های مرکزی قطعات ضخیم فولاد ساده کربنی، حتی با کوئنچ فولاد در آن به‌ساختارهای سخت مارتنزیتی تشکیل نخواهد شد.

۵- مراجع

[۱] م.ع. گل‌عذار، "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها"، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۱.

[۲] س. شاهنده، م. مکارم، "شبه‌سازی کوئنچ و برآورد ساختار و سختی قطعات فولادی آبداده شده"، سمپوزیوم فولاد، ۱۳۸۴.