

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## Effect of Residual Elements on Hot Deformation Behavior of 16MnCr5 Steel

### Abstract

Increasing usage of scraps has led to elevate the amount of residual elements in steels. Usually, scraps contain residual elements such as Cu, Sn, Sb and As, which lead to reduce mechanical properties of steels, particularly formation of cracks in ingots during hot deformation processes. In this research hot deformation behavior of 16MnCr5 steel in temperature range of 850-1120 °C has been investigated. Analysis of compounds formed on fracture surfaces and surrounding cracks by Scanning Electron Microscope show that maximum Cu-rich phases were formed at 1000 °C. This problem is due to excessive amount of copper in steel scraps, which enriches during oxidation and consequently melts and penetrates to austenite grain boundaries. In order to separate materials containing copper and tin, more precise control of scraps use as charging materials is needed to improve high temperature workability and consequently residual elements induced surface cracks.

**Key words:** Steel scraps, hot deformation, fracture surface, Cu-rich phase, grain boundary, hot shortness

## تأثیر عناصر ناخالصی بر قابلیت تغییر شکل گرم فولاد از جنس ۱۶MnCr۵

### چکیده

افزایش استفاده از قراضه های متنوع در کوره های قوس الکتریک منجر به افزایش مقدار عناصر ناخالصی در فولادها شده است. قراضه ها معمولاً حاوی عناصر ناخالصی (پسماند) نظیر مس، قلع، سرب، آنتیموان و آرسنیک هستند، که منجر به کاهش خواص مکانیکی فولاد بویژه تشکیل ترک در شمش های تولید شده حین انجام فرآیندهای کارگرم می شوند. در تحقیق صورت گرفته قابلیت تغییر شکل گرم فولاد از جنس ۱۶MnCr۵ در محدوده دمایی  $۱۱۲۰^{\circ}\text{C} - ۸۵۰^{\circ}\text{C}$  مورد ارزیابی قرار گرفته است. آنالیز ترکیبات تشکیل شده بر روی سطوح شکست و ترک های ایجاد شده در اطراف آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده بیشترین تشکیل فازهای غنی از مس در دمای  $۱۰۰۰^{\circ}\text{C}$  است. این مشکل ناشی از مقادیر بیش از حد مس در قراضه های فولادی است، که حین اکسیداسیون فولاد غنی شده و نتیجتاً ذوب شده و به مرزدانه دانه های آستنیت نفوذ می کند. کنترل دقیق تر قراضه های مورد استفاده به عنوان مواد شارژی برای تفکیک مواد حاوی عناصر مضر نظیر مس و قلع در افزایش خواص شکل دهی دمای بالا و نتیجتاً کاهش ترک های سطحی ناشی از این عناصر موثر خواهد بود.

واژه های کلیدی: قراضه های فولادی، تغییر شکل گرم، سطح شکست، فاز غنی از مس، مرزدانه، گسیختگی گرم

## مقدمه

بازیابی قراضه های فولادی به عنوان موضوعی برای محافظت از محیط زیست جهانی شناخته می شود. قراضه ها معمولاً حاوی عناصر ناخالصی (پسماند) نظیر مس، قلع، سرب، آنتیموان و آرسنیک هستند، که منجر به کاهش خواص مکانیکی فولاد می شوند. بخصوص، شمش های تولید شده از قراضه ها در معرض تشکیل عیوبی نظیر ترک ها حین فرآیندهای کارگرم (نورد گرم و آهنگری) هستند. در حالیکه اکثر عناصر ناخالصی از طریق فرآیندهای فولادسازی خارج می شوند، اما مس و قلع از طریق روش های موجود بطور کامل حذف نمی شوند (Nagasaki & Kihara, ۱۹۹۷).

در طول فرآیند فولادسازی، شمش ریختگی حاوی مقادیر زیاد مس پسماند پس از ریخته گری در معرض اتمسفر اکسید کننده قرار می گیرد. بنابراین برای تشکیل لایه های اکسیدی، آهن اکسید می شود، در حالیکه مس بدلیل پتانسیل اکسیداسیون کمتر نسبت به آهن در فصل مشترک لایه اکسیدی/آستنیت غنی می شود. غنی شدن مس به سرعت فراتر از حد حلالیت آن در فاز فولاد جامد (آستنیت) افزایش یافته، و در صورتیکه دما بالاتر از  $1100^{\circ}\text{C}$  باشد، یک فاز غنی از مس مذاب در فصل مشترک لایه اکسیدی/آستنیت تشکیل می شود. پس از آن فاز مذاب به مرزدانه های آستنیت نفوذ کرده و نتیجتاً در صورت اعمال نیروی مکانیکی سطح فولاد ترک می خورد. گسیختگی گرم سطحی (surface hot shortness) معمولاً حین فرآیندهای سرمایش ثانویه، گرمایش مجدد، نورد گرم و فورج تشکیل می شود (Yin, Sampson, Nakano & Sridhar, ۲۰۱۱). بنابراین قابلیت تغییر شکل گرم فولادهای حاوی عناصر ناخالصی بایستی مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای موثر بر شکل دهی گرم و روشی برای بهبود آن بایستی مورد ارزیابی قرار بگیرند (Nagasaki & Kihara, ۱۹۹۷).

## روش تحقیق

ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این تحقیق از جنس DIN: ۱۶MnCr۵ به شماره ۱/۷۱۳۱ در جدول ۱ نشان داده می شود. به منظور بررسی رفتار کارگرم فولاد در دماهای مختلف از تست کشش گرم براساس استاندارد DIN ۵۰۱۲۵ استفاده شده است (شکل ۱). نمونه های کشش از مقطع عرضی یک شمش ۱۱ تنی ذوب شده در کوره قوس الکتریکی و ریخته گری شده با استفاده از روش مذاب ریزی از کف در کوکیل فلزی تهیه شده اند. سیکل دمای طراحی شده برای انجام تست کشش گرم در شکل ۲ نشان داده می شود. به منظور مشاهده ریزساختار مناطق نزدیک سطوح شکست، نمونه ها از مرکز مقطع شکست بصورت طولی بریده شده اند. برای مشاهده ریز ساختار از میکروسکوپ SEM و از EDX برای تعیین ترکیب شیمیایی فازهای موجود در مناطق اطراف سطوح شکست استفاده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (درصد وزنی)

Zn	Sn	Ni	Cu	S	P	Cr	Mn	Si	C
۰/۰۰۱	۰/۰۱۲	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۱۸	۰/۹۴	۱/۱۴	۰/۲۳	۰/۲

## نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ الکترونی در حالت الکترون برگشتی از نمونه کشش گرم در دمای  $۸۵۰^{\circ}\text{C}$  در مقطع طولی از سطح شکست در شکل ۳ نشان داده می شود. سطوح شکست نمونه در این دما نشان دهنده وقوع شکست ترد و بین دانه ای است، همچنین بدلیل قرارگیری دمای نمونه در منطقه دوفازی آستنیت و فریت به نظر می رسد که تشکیل فریت های پرویوتکتوئید در مرزدانه ها منجر به تضعیف مرزدانه ها و نتیجتاً اشاعه ترک ها از این مناطق شده است. تصاویر مربوط به نمونه در دمای  $۹۵۰^{\circ}\text{C}$  در مقطع طولی از سطح شکست نشان دهنده حضور مقادیر جزئی از ترکیبات غنی از مس بصورت ذرات کروی بر روی سطوح شکست و داخل ترک های ایجاد شده در سطح مقطع هستند (شکل ۴). بررسی های صورت گرفته از ترک های تشکیل شده در سطح مقطع نمونه کشش در دمای  $۱۰۰۰^{\circ}\text{C}$  نشان دهنده وجود مقادیر بیشتری از ترکیبات غنی از مس است (شکل ۵ و ۶). همچنین فازهای مشابهی در ترک های تشکیل شده و سطوح شکست در نمونه های کشش گرم در دماهای  $۱۰۵۰^{\circ}\text{C}$  و  $۱۱۲۰^{\circ}\text{C}$  مشاهده می شوند (شکل ۷ و ۸). آنالیز EDX ترکیبات نشان دهنده حضور ترکیب  $۱۱/۲\% \text{Fe}-۶۱/۷\% \text{Cu}-۲۵/۹\% \text{Zn}$  (درصد وزنی) در فازهای تشکیل شده است (شکل ۹).

با توجه به حضور ترکیبات غنی از مس بر روی سطوح شکست و همچنین داخل ترک های ایجاد شده در مقاطع نمونه ها به عنوان یکی از عوامل موثر بر کاهش قابلیت تغییر شکل گرم، به نظر می رسد که مکانیزم تشکیل ترکیبات و عوامل موثر بر آنها بایستی مورد ارزیابی قرار گیرند.

## مکانیزم تأثیر مس بر کاهش قابلیت انعطاف پذیری گرم فولاد

حضور مس در فصل مشترک لایه اکسیدی/فولاد (آستنیت) بدلیل اکسیداسیون انتخابی سطح فولاد و عدم حل پذیری مس در لایه اکسیدی صورت می گیرد. فرآیند اکسیداسیون بصورت یک تابع پارابولیک از زمان بوده و آزمایشات مختلف نشان می دهند که غنی شدن مس در زیر لایه اکسیدی وابسته به گستره لایه اکسید شده است. سرعت اکسیداسیون سطح فولاد وابسته به دما بوده و به همین دلیل سرعت غنی شدن متأثر از دو پارامتر دما و مقدار مس در ترکیب فولاد است. در یک دمای مشخص، با افزایش مقدار مس در ترکیب فولاد، مقدار بیشتری از ترکیبات غنی از مس در فصل مشترک تشکیل خواهد شد. همچنین با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون و غنی شدن افزایش می یابد. در ابتدا حرکت در مرزدانه تا جایی غالب خواهد بود که ضریب نفوذ مس به اندازه کافی برای شروع با یک جبهه نفوذی زیاد باشد. ضریب نفوذ بصورت نمایی با دما افزایش می یابد. بنابراین، غنی شدن، نفوذ و حرکت مرزدانه ای مکانیزم های با بازه دمایی تشکیل ترگ گرم هستند. حرکت در مرزدانه یک فرآیند نفوذی بوده و وابسته به غنی شدن و دما است. بدون تجمع مقدار کافی از ترکیبات حاوی مس در زیر لایه اکسیدی، بنابراین غلظت قابل ملاحظه ای از مس در مرزدانه ها وجود نداشته و مشکلی در ارتباط با ترک گرم ایجاد نخواهد شد (Torkar, ۲۰۱۰).

بطور کلی مس از فیلم مذاب غنی از مس به داخل زمینه آهن نفوذ می کند، و اتم های آهن از دانه ها به مرزدانه ها جابجا می شوند. ضریب نفوذ درخود آهن در آستنیت در دمای  $۱۱۰۰^{\circ}\text{C}$ ،  $۵/۹۶ \times ۱۰^{-۱۶} \text{m}^2/\text{s}$  بوده و ضریب نفوذ مس در آستنیت  $۱/۰۴ \times ۱۰^{-۱۵} \text{m}^2/\text{s}$  است. نسبت بین ضریب نفوذ مس و ضریب نفوذ در خود آهن برابر با  $۱/۷$  است. طبق مطالعات انجام شده توسط



کرکندال در چنین موردی تهی جای ها در منطقه با غلظت مس پایین ایجاد می شوند. تهی جای ها به سمت مناطق با غلظت مس زیاد نفوذ کرده و در آنجا تجمع می کنند. در این حالت بیشترین تجمع تهی جای ها در بیشترین گرادیان غلظتی، نزدیک مرزدانه یا در فصل مشترک بین مس مذاب و دانه های آهن خواهد بود. حین تجمع تهی جای ها، یک حفره یا ترک در مرز تشکیل شده که توسط مس مذاب پر می شود. در واقع پس از اینکه مس مذاب با آهن جامد تماس پیدا می کند، مس در امتداد مرزدانه ها و داخل دانه ها نفوذ می کند. در این حالت تهی جای ها به سمت فصل مشترک ها و مرزدانه ها نفوذ کرده و در آنجا تجمع و متراکم می شوند و یک شیار در مرزدانه ها تشکیل می شود. با افزایش متراکم شدن تهی جای ها، شیار به داخل مرزدانه ها رشد پیدا کرده و یک کانال مرزدانه ای ایجاد می شود. حین تشکیل شیار و کانال، مس مذاب بدلیل تعادل تنش سطحی به داخل شیار و کانال جریان پیدا می کند (Fredriksson, Hansson & Olsson, ۲۰۰۱).

#### تأثیر نیکل بر تشکیل ترک گرم (گسیختگی گرم) ناشی از ترکیبات مس

مطالعات محققان بر سیستم های Fe-Cu-Ni نشان می دهد که مقدار مس در نزدیک دانه های آستنیت با افزایش نسبت نیکل به مس افزایش می یابد، که با افزایش شار اتم ها به طرف زمینه همراه خواهد بود. بدلیل اینکه غلظت مس در طرف دانه های آستنیت (در فولاد با نسبت برابر نیکل و مس) دو برابر مقدار فولاد بدون نیکل است، مقدار شار اتم های مس به طرف زمینه دو برابر خواهد بود. اینطور بنظر می رسد که کاهش مقدار فاز غنی از مس مذاب در فولاد حاوی نیکل ناشی از افزایش شار اتم های مس به طرف زمینه است که با کاهش ترک سطح سطحی ناشی از فاز مذاب غنی از مس منجر می شود (Imai, Komatsubara & Kunishige, ۱۹۹۷). در مواردی هم گزارش شده است که کاهش فاز مذاب در اثر افزایش مقادیر نیکل می تواند ناشی از موارد ذیل باشد: (۱) تجمع فاز مذاب غنی از مس داخل اکسیدهای خارجی؛ (۲) کاهش سرعت اکسیداسیون؛ (۳) افزایش حد حلالیت مس در آستنیت یا انجماد فاز مذاب غنی از مس (Yin, Sampson, Sridhar & Nakano, ۲۰۱۱). با توجه به حضور نیکل به مقدار ۰/۱۶ درصد وزنی در ترکیب شیمیایی، به نظر می رسد مقدار آن برای کاهش تشکیل فازهای غنی از مس کافی نبوده و نیاز به مقادیر بیشتری است.

#### تأثیر قلع بر تشکیل ترک گرم (گسیختگی گرم) ناشی از ترکیبات مس

مطالعات محققان مختلف نشان می دهد که قلع اثرات ذیل را به همراه دارد: (۱) کاهش نرخ اکسیداسیون؛ (۲) ایجاد فصل مشترک صاف میان لایه اکسیدی/فولاد و (۳) افزایش قابل توجه نفوذ فاز مذاب و گسیختگی مرزدانه (Yin & Sridhar, ۲۰۱۰).

در مقایسه ای که بین فولاد یاتاقان حاوی مس و فولاد یاتاقان حاوی قلع صورت گرفته است، ترکیبات غنی از مس در فولاد حاوی مس تشکیل شده، در حالیکه در فولاد حاوی قلع هیچگونه فاز غنی از قلع در فصل مشترک لایه اکسیدی/آستنیت مشاهده نشده است. اینطور به نظر می رسد که قلع به زمینه فولاد نفوذ کرده و در فصل مشترک تجمع نمی شود، در حالیکه مس با سرعت قلع نفوذ نکرده و در فصل مشترک تجمع می کند. گزارش شده است که ضریب نفوذ قلع،  $D_{Sn}$ ، در حدود ده برابر بیشتر از ضریب نفوذ مس،  $D_{Cu}$ ،

است. بطور مثال،  $D_{cu}$  و  $D_{sn}$  در آستنیت در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  به ترتیب  $(m^2/s)$   $1/9 \times 10^{-14}$  و  $9/6 \times 10^{-16}$  است. میانگین فاصله نفوذ طی شده از معادله  $(D.t)^{1/2}$  برای قلع مس،  $d_{cu}$  و  $d_{sn}$ ، در زمان ۷۲۰۰ ثانیه (۲ ساعت) به ترتیب ۱۲ و ۲/۶ میکرومتر هستند (Imai, Komatsubara & Kunishige, ۱۹۹۷).

گرچه حضور قلع نرخ اکسیداسیون را کاهش می دهد، که می تواند با خروج مقدار کمتر مس همراه باشد، اما بدلیل اینکه فاز مذاب مقدار زیادی قلع در بر می گیرد و فلاکس نفوذ برگشتی مس در مقایسه با سیستم دوتایی Fe-Cu کمتر است، مقدار فاز مذاب در فصل مشترک لایه اکسیدی/آستنیت را کاهش نمی دهد. همچنین بدلیل عدم ایجاد فصل مشترک موجی شکل توسط قلع، امکان تجمع فاز مذاب غنی از مس داخل اکسیدهای خارجی وجود نداشته و بنابراین در کاهش ترک گرم موثر نخواهد بود. بیشترین اثر تخریبی در مواردی است که مقدار قلع کمتر از ۰/۳ درصد وزنی باشد و نفوذ مرزخانه ای و گسستگی قابل ملاحظه را در زمان های کوتاه قرارگیری در معرض محیط اکسید کننده بوجود می آورد (Yin & Sridhar, ۲۰۱۰). در طول فرآیند گرمایش مجدد، مرزخانه به میزان قابل توجهی تضعیف شده و اعمال فرآیند های شکل دهی با انتشار ترک ها به عمق های بیشتری همراه خواهد بود. علاوه بر اثرات تخریبی مورد بحث، در تحقیقات گزارش شده است که قلع حلالیت مس در آستنیت را کاهش داده و نقطه ذوب فاز غنی از مس را کاهش می دهد (Imai, Komatsubara & Kunishige, ۱۹۹۷).

### تأثیر دمای اکسیداسیون بر تشکیل ترکیبات غنی از مس

نتایج یکی از تحقیقات صورت گرفته بر روی فولاد حاوی مس و نیکل نشان می دهد که مقدار فاز غنی از مس تشکیل شده در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  خیلی بیشتر از مقدار آن در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  است. به نظر می رسد که پیش از غنی شدن مس به مقدار کافی، مناطق غنی شده بدلیل اکسیداسیون شدید در داخل لایه اکسیدی تجمع کرده اند. ضخامت لایه اکسیدی تشکیل شده در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  دو برابر مقدار آن در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  است. همچنین اختلاف سرعت نفوذ مس و نیکل می تواند بر علت تشکیل مس و نیکل با نسبت های پایین در فازهای موجود در لایه اکسیدی مهم باشد. ضریب نفوذ مس و نیکل در آستنیت در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  به ترتیب برابر  $5/1 \times 10^{-15}$  و  $2/3 \times 10^{-15}$  هستند؛ نفوذ مس در حدود دو برابر سریع تر از نیکل است. این امر نشان می دهد که نفوذ اتم های مس به زمینه خیلی سریع تر از اتم های نیکل صورت می گیرد، در واقع غنی شدن مس در فصل مشترک کمتر از نیکل بوده و این منطقه در داخل لایه اکسیدی تجمع می کند. همچنین ضریب نفوذ مس در آستنیت در دماهای  $1100^{\circ}\text{C}$  و  $1200^{\circ}\text{C}$  به ترتیب برابر  $9/6 \times 10^{-16}$  و  $5/1 \times 10^{-15}$  است. سرعت نفوذ اتم های مس در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  در حدود پنج برابر بیشتر از دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  است. بنابراین، غنی شدن مس در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  در فصل مشترک لایه اکسیدی/آستنیت خیلی کمتر از دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  است. همچنین ناهمواری بیشتر فصل مشترک در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  می تواند بر عدم تشکیل ترکیبات غنی از مس و نیکل موثر باشد (Imai, Komatsubara & Kunishige, ۱۹۹۷).

بررسی تصاویر SEM سطوح شکست در دماهای مختلف نشان دهنده تشکیل بیشترین ترکیبات غنی از مس در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  است. با توجه به اینکه نتایج تحقیقات محققان مختلف نشان دهنده بیشترین احتمال تشکیل ترکیبات غنی از مس و نتیجتاً افزایش احتمال تشکیل ترک در دمای  $1150^{\circ}\text{C}$  است، به نظر می رسد حضور روی (به مقدار حدود ۲۵ درصد وزنی) در ترکیب غنی از مس منجر به

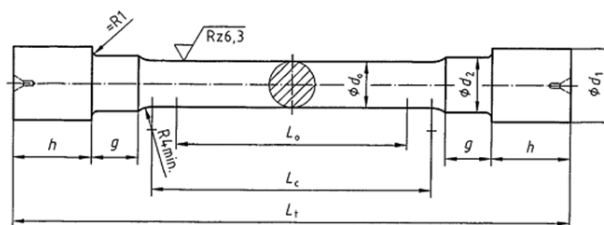
کاهش نقطه ذوب و تشکیل آن در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  شده است. همچنین کاهش ترکیبات غنی از مس در دماهای  $1050^{\circ}\text{C}$  و  $1120^{\circ}\text{C}$  می تواند ناشی از افزایش سرعت اکسیداسیون و نتیجتاً ضخیم تر شدن لایه اکسیدی و تجمع ترکیبات غنی از مس در آنها، و یا افزایش سرعت نفوذ مس و برگشت به طرف زمینه باشد. با توجه به تغییرات مقادیر عناصر ناخالصی در قراضه های مورد استفاده در تولید شمش های فولادی و نتیجتاً تأثیرات آنها بر تغییر دمای تشکیل ترکیبات مضر، به نظر می رسد مقدار محدوده مجاز آنها برای جلوگیری از تشکیل ترک گرم حین اعمال فرایندهای تغییر شکل گرم (نورد گرم و آهنگری) بایستی در نظر گرفته شود.

### نتیجه گیری

- (۱) بدلیل افزایش بازیابی قراضه های فولادی مقدار عناصر ناخالصی در فولاد افزایش یافته است. بنابراین، شناسایی و مشخص کردن اثرات مضر برای کنترل آنها در محدوده قابل قبول امری ضروری است.
- (۲) حضور ترکیبات غنی از مس در سطوح شکست و ترک های ایجاد شده در نمونه های کشش گرم به عنوان یکی از دلایل مهم کاهش خواص تغییر شکل گرم شناخته می شود.
- (۳) سرعت حرکت فیلم مذاب تشکیل شده داخل مرزدانه ها می تواند به عنوان یک تعادل میان نفوذ تهی جای ها از جامد به نوك جبهه مذاب و جریان داخلی فیلم مذاب داخل مرزدانه ها توصیف شود.
- (۴) استفاده از نیکل بدلیل افزایش حد حلالیت مس در آستنیت، افزایش نقطه ذوب فاز غنی از مس و ایجاد فصل مشترک لایه اکسیدی/آستنیت موجی شکل به منظور تجمع فازهای تشکیل شده در کاهش تشکیل ترک های طولی موثر خواهد بود. با توجه به حضور مس به مقدار  $0/18$  درصد وزنی به نظر می رسد مقدار نیکل ( $0/16$  درصد وزنی) برای کاهش ترکیبات غنی از مس کافی نباشد.
- (۵) حضور قلع در ترکیب بدلیل کاهش حد حلالیت مس در آستنیت، کاهش نقطه ذوب فاز غنی از مس، افزایش سرعت نفوذ در مرزدانه های آستنیت نسبت به مس ترک های بین دانه ای را تشدید می کند.
- (۶) بیشترین ترکیبات غنی از مس در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  تشکیل شده است، که می تواند ناشی از کاهش نقطه ذوب این ترکیبات توسط روی باشد. کاهش مقدار این فاز ها در دماهای  $1050^{\circ}\text{C}$  و  $1120^{\circ}\text{C}$  می تواند بدلیل ضخیم تر شدن لایه های اکسیدی و تجمع در آنها و یا افزایش سرعت نفوذ مس و برگشت به زمینه باشد.
- (۷) کنترل دقیق تر قراضه های مورد استفاده به عنوان مواد شارژی برای تفکیک مواد حاوی عناصر مضر نظیر مس، قلع و روی در افزایش خواص تغییر شکل دمای بالا و نتیجتاً کاهش ترک های سطحی ناشی از این عناصر موثر خواهد بود.



## شکل ها



Key:

$d_o$  = test piece diameter

$d_1$  = diameter of ISO metric thread

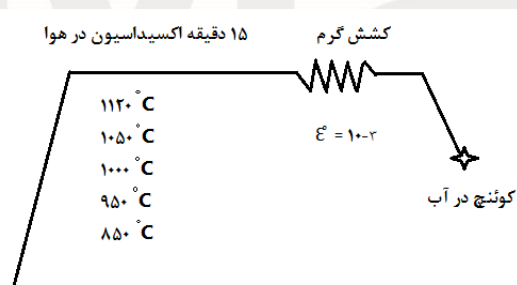
$h$  = length of gripped ends

$L_o$  = original gauge length ( $L_o = 5d_o$ )

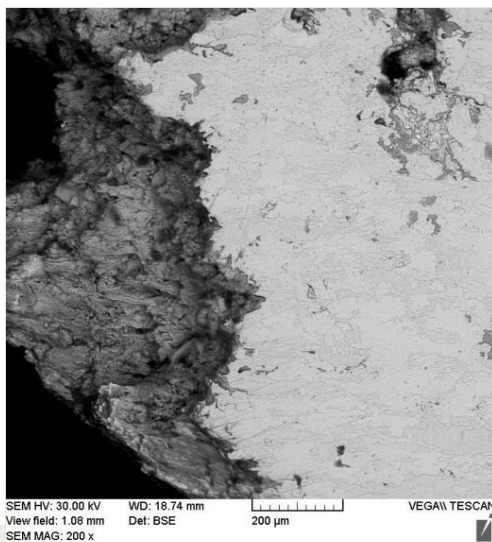
$L_c$  = parallel length ( $L_c \geq L_o + d_o$ )

$L_t$  = total length of test piece

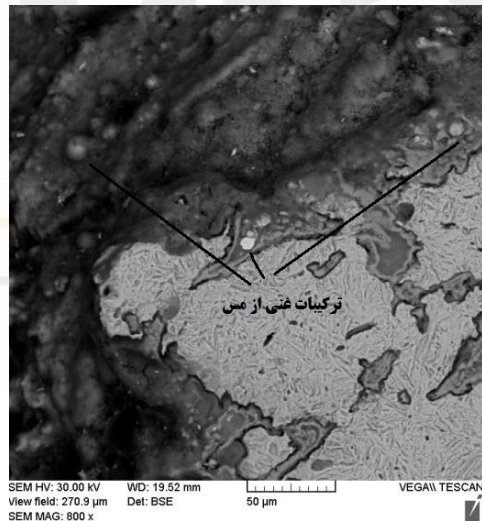
شکل ۱- شماتیکی از نمونه کشش گرم براساس استاندارد DIN ۵۰۱۲۵



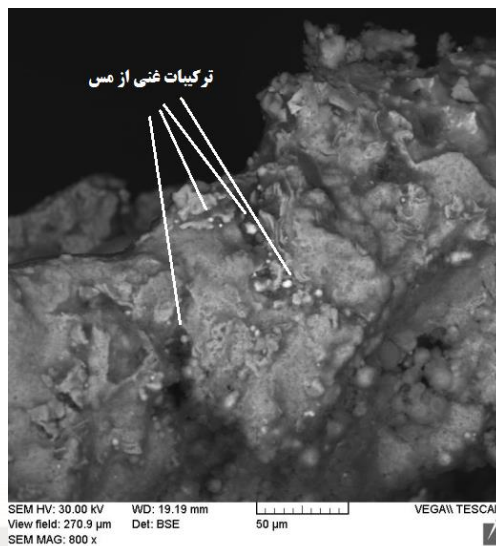
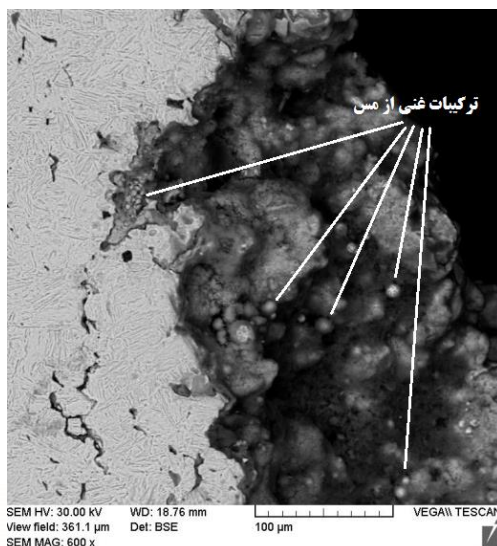
شکل ۲- سیکل دمایی اعمال شده



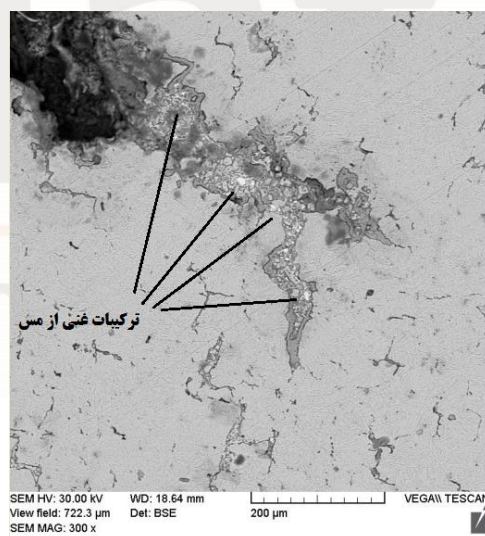
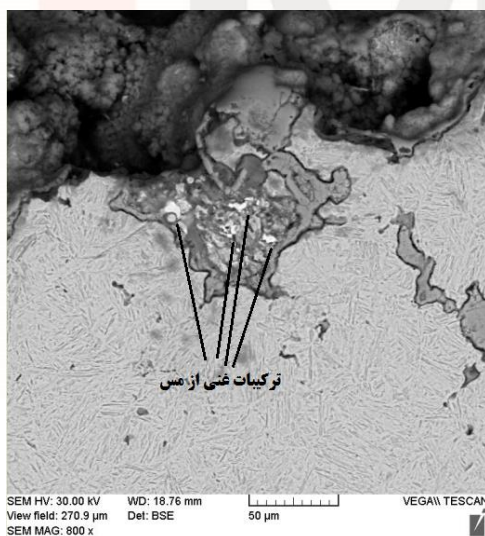
شکل ۳- مقطع شکست نمونه کشش گرم در دمای  $۸۵۰^{\circ}\text{C}$



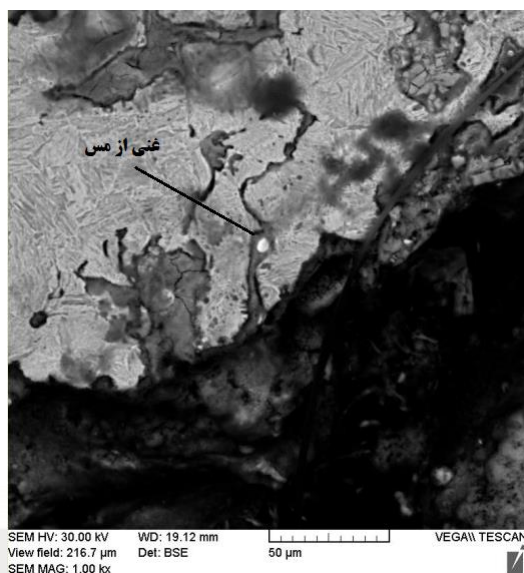
شکل ۴- مقطع شکست نمونه کشش گرم در دمای  $۹۵۰^{\circ}\text{C}$



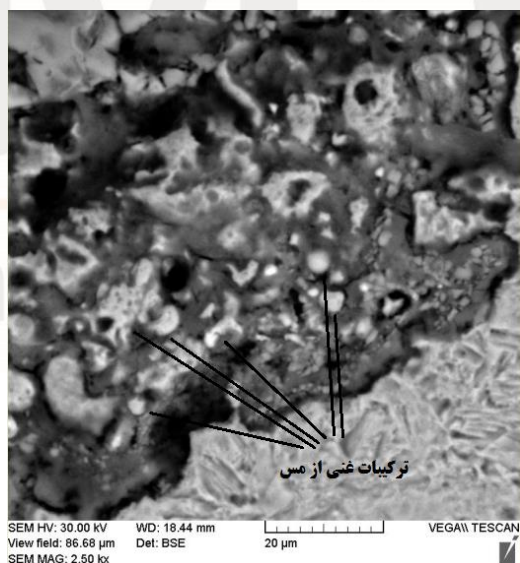
شکل ۵- مقطع شکست نمونه کشش گرم در دمای ۱۰۰۰°C



شکل ۶- ترکیبات غنی از من تشکیل شده داخل ترک های سطح مقطع در دمای ۱۰۰۰°C (فازهای سفید رنگ داخل ترک ها)

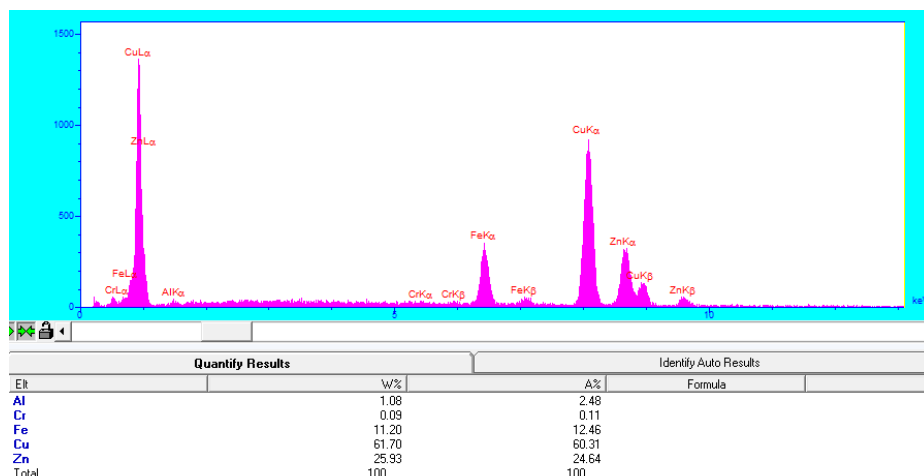


شکل ۷- ترکیبات غنی از مس تشکیل شده داخل ترک های سطح مقطع در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$



شکل ۸- ترکیبات غنی از مس تشکیل شده داخل ترک های سطح مقطع در دمای  $1120^{\circ}\text{C}$





شکل ۹- آنالیز EDX ترکیبات غنی از مس

## منابع

- Fredriksson, H., K. Hansson & A. Olsson. (2001). "On the mechanism of liquid copper penetration into iron grain boundaries". Scandinavian Journal of Metallurgy, 30, 41.
- Imai, N., N. Komatsubara and K. Kunishige. (1997). "Effect of Cu and Ni on hot workability of hot-rolled mild steel". ISIJ Int. vol. 37 (3), 224.
- Imai, N., N. Komatsubara, and K. Kunishige. (1997). "Effect of Cu, Sn and Ni on hot workability of hot-rolled mild steel". ISIJ international, 37(3), 217.
- Nagasaki, Ch., and J. Kihara. (1997). "Effect of Copper and Tin on hot ductility of ultra-low and 0/2% carbon steels". ISIJ Int, vol 37, No 8, 523.
- Torkar, M. (2010). "Effect of trace and residual elements on the hot brittleness, hot shortness and properties of 0/15-0/3% C Al-killed steels with a solidification microstructure". Materiali In Tehnologije, 44(6), 327.
- Yin, L., E. Sampson, J. Nakano, S. Sridhar. (2011). "The effects of Nickel/Tin ratio on Cu induced surface hot shortness in Fe". Oxidation of Metals 76(6-5), 367.
- Yin, L., and S. Sridhar. (2010). "Effects of small additions of Tin on high-temperature oxidation of Fe-Cu-Sn alloys for surface hot shortness". Metallurgical and Materials Transactions B, 41(5), 1095.