

## تأثیر عناصر کنترل کننده شکل سولفید و ریز کننده دانه بر خواص فولاد پر استحکام

مخاطب الاسلام صدر نژاد (دانشیار)  
دانشکده مهندسی متالورژی

### چکیده:

تحقیقات انجام شده در مورد نقش عناصر کنترل کننده شکل سولفید و ریز کننده ابعاد دانه در ساختار کریستالی فولاد همچون عناصر نادر خاکی و عناصر تشکیل دهنده رسوبات کاربیدی و کار بونترییدی ریز نشان دهنده تغییر خواص کششی مقاومت ضربه ای و میزان سختی پذیری فولاد در نتیجه افزایش مقادیر جزئی این عناصر و اعمال عملیات مکانیکی، حرارتی و شیمیایی است. مکانیزم تأثیر این عملیات بر خواص فولاد بسیار پیچیده بوده و درک نحوه عمل آنها نیاز به بررسیهای دقیق ساختمان کریستالی و تجزیه شیمیایی رسوبات ریز (حدود میکرون) ترکیبات عناصر میکرو آلیاژی دارد. این مطالعات با کمک میکروسکوپیهای نوری و الکترونی و وسائل تعیین میکرو آنالیز مقاطع نمونه های فولادی در حال انجام می باشد.

### مقدمه

هدف از افزودن عناصر میکرو آلیاژی کنترل شکل سولفید و یا بهبود خواص مکانیکی فولاد است. نحوه عمل این عناصر فعل و انفعال با عناصر محلول بین نشین و ایجاد ترکیباتی است که به شدت بر خواص فولاد تأثیر دارند. عناصر نادر خاکی برای مثال اگر به فولاد اضافه شوند، با گوگرد موجود در فولاد ترکیب شده و منگنز را آزاد می کنند. سولفیدهای عناصر نادر خاکی در دمای کار گرم قابلیت شکل پذیری کمتری نسبت به سولفید منگنز داشته و بر خلاف سولفید منگنز در جهت تغییر فرم، طولیل نمی شوند. بنابراین این افزایش عناصر نادر خاکی اولاً باعث بهبود خواص مکانیکی فولاد در جهت عمود بر تغییر فرم و ثانیاً سبب زیاد شدن قابلیت تغییر شکل گرم می شود [۱]. دسته دیگر عناصر میکرو آلیاژی مانند V, Nb, Ti میل ترکیبی شدیدی با کربن و نیتروژن دارند. مکانیزم عمل این عناصر با عناصر نادر خاکی کاملاً متفاوت است. به طوری که کاربید، نیتريدو کاربونتریید این عناصر بصورت رسوبات بسیار ریز در دمای تغییر فرم گرم و کمتر از آن در مقطع میکروسکوپی فولاد ظاهر شده و مانع فرآیند تبلور مجدد و رشد دانه ها می شوند. مکانیزم تأثیر این عناصر بر خواص فولاد بسیار پیچیده بوده و تابع تاریخچه عملیات حرارتی، مکانیکی و شیمیایی بر فولاد است. مطالعات وسیعی در این زمینه اکنون در جریان است که به دلیل اهمیت موضوع و گستردگی دامنه کاربرد، مورد بحث آخرین مجلات و سمینارهای علمی دنیا است [۲-۵]. در این تحقیق به بررسی نقش عناصر نادر خاکی در کنترل شکل سولفیدها و مکانیزم تأثیر عناصر تشکیل دهنده رسوبات ریز کار بونترییدی بر ساختار میکروسکوپی و خواص فولادهای کم آلیاژ و کم کربن فرستنی (جدول ۱) پرداخته شده است.

### روش آزمایش

آزمایشهای مربوط به کنترل شکل سولفیدها با استفاده از عناصر سریوم، لانتانیم و نشودیمیم به فرم موجود در آلیاژ تجارتهی میش متال (Mischmetal) و آزمایشها مربوط به تنظیم ابعاد دانه ها با استفاده از عناصر وانادیوم و ناپوییم انجام شده است. عملیات ذوب و آلیاژ سازی در کوره های القائی فرکانس بالا و مقاومتی انجام شده و عناصر میکرو آلیاژی از طریق غوطه وری کپسولی از جنس فولاد کم کربن حاوی عناصر میکرو آلیاژی به داخل بوتنه محتوی فلز مذاب انجام شده است [۷]. ابعاد کوره پاتیل، بوتنه و قالب در آزمایشهای مختلف فرق داشته و از ۴۵۰ گرم تا حدود ۲ تن تغییر کرده است. عملیات مکانیکی و حرارتی مشتمل بر:

الف) آهنگری داغ در دمای پایداری آستنیت و آب دادن و بازگشت ب) نورد گرم در محدوده پائینی دماهای پایداری آستنیت و تعادل آستنیت - فریت و سپس عملیات آب دادن و بازگشت بوده است. تاثیر عملیات مختلف آلیاژ سازی، آهنگری، نورد، نرم‌انیزاسیون و آب دادن بر دانه بندی و خواص فولاد از طریق بررسی ریز ساختار و مقاطع حکاکی شده نمونه‌ها توسط میکروسکوپیهای نوری و الکترونی انجام گرفته و نتایج حاصل در مقالات مدون علمی به طور جداگانه ارائه خواهد شد [۸]. آهنگری نمونه‌ها طی حدود ۱۰۰ ثانیه و در دمای ۱۲۰۰ از طریق اعمال حدود ۳۰ ضربه توسط بتک انجام شده و باعث ۳/۷ برابر شدن طول قطعات گردیده است. نورد گرم از دمای ۹۱۰ درجه سانتیگراد شروع و در دمای ۶۵۰ خاتمه یافته به طوری که شروع تغییر فرم در دمای تعادلی آستنیت و پایان آن در دمای تعادلی فریت قرار داشته است. نورد در ۱۰ مرحله و هر بار به میزان ۱۵% انجام شده و نسبت ضخامت نهائی به ضخامت اولیه قطعات حدود ۱/۱۵ بوده است. مطالعات ساختاری و تستهای مکانیکی در جهات طولی و عرضی انجام شده و دیاگرامهای تنش - کرنش نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی ترسیم شده‌اند (شکل‌های ۱ و ۲) آزمایشهای ضربه و سختی به ترتیب بر نمونه‌های آهنگری و نورد انجام شده و نتایج بدست آمده با نتایج بررسیهای ساختاری مقایسه شده‌اند. مطالعات بدست آمده هنوز تحت بررسی است. و پس از تکمیل در جهت پیشبرد مراحل بعدی تحقیق مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

### نتیجه گیری و بحث

نتیجه آزمایشهای مکانیکی نشان دهنده تاثیر عناصر نادر خاکی بر نقطه تسلیم، استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه و شکل پذیری فولاد است. تفاوت این تاثیرات در جهات طولی و عرضی به وضوح قابل تشخیص است به طوری که تغییر در میزان شکل پذیری در اثر افزایش عناصر نادر خاکی در جهت عرضی را در بیشتر نمونه‌های آهنگری شده به سادگی می‌توان ملاحظه نمود. این تغییرات در پاره‌ای از نمونه‌ها در جهت خلاف انتظار بوده و نشان دهنده تاثیر زیاد شرایط شیمیائی و عملیات آلیاژ سازی بر خواص فولادها به خصوص با توجه به ترکیب شیمیائی آنها است. تغییر شکل ناخالصیهای سولفیدی در هنگام آهنگری از طریق بررسیهای ساختاری به طور واضحی قابل رویت بوده و کشیدگی این ناخالصیها را در نمونه‌های فاقد عناصر نادر خاکی در جهات طولی شدن نمونه، آشکار می‌سازد (شکل ۳). این ناخالصیها در نمونه‌های دارای عناصر نادر خاکی در تمام مقاطع کروی و با ابعاد از ۰/۵ تا حداکثر ۲۰ میکرون دیده می‌شود. لذا به نظر می‌رسد تنزل خواص مکانیکی نمونه‌های ۱ تا ۴ مربوط به تغییر ترکیب شیمیائی فولاد و همچنین جذب هوا توسط نمونه‌ها در حین عملیات آلیاژ سازی و تولید رسوبات اکسی سولفیدی باشد. به این دلیل لازم است عملیات آلیاژ سازی تحت آتمسفر کنترل شده انجام شود.

نتیجه آزمایشهای مکانیکی در مورد فولادهای ریخته شده، ریخته شده نرمالیزه، ریخته شده - آب داده و بازگشت داده شده، نورد شده، نورد شده نرمالیزه و نورد شده - آب داده و بازگشت داده شده دارای عناصر میکرو آلیاژی کاربیدزا و کاربونیتریدزا نشان دهنده افزایش تنش تسلیم، استحکام کششی و سختی در اثر افزایش عناصر میکرو آلیاژی و انجام عملیات مکانیکی نورد گرم در دماهای بسیار پائین پایداری آستنیت و تبدیل آستنیت به فریت در عین حفظ میزان تغییر طول نسبی پلاستیک در حد قابل قبول می‌باشد. این بررسیها همچنین نشان دهنده تاثیر عملیات مکانیکی بر افزایش ابعاد ناخالصیها و کاهش ابعاد بلورهای فلز است. تغییر زمینه فولاد از فریت ظریف به فریت+پرلیت (و یا مارتنزیت) و جابجائی دمای شروع تغییر حالت در دیاگرامهای CCT در رابطه با افزایش V و عناصر Nb و انجام عملیات مکانیکی نیز بر اساس نتایج آزمایش قابل بحث و بررسی است. مطالعات انجام شده بیانگر بهبود قابل ملاحظه خواص فولادهای Nb+V و V می‌باشد و در صورت انجام عملیات ترمومکانیکی در دماهای بسیار پائین در عملیات نورد گرم است. بر اساس اطلاعات ارائه شده در مقالات علمی، این شیوه از نظر اقتصادی می‌تواند قابل قبول بوده [۸] و در صورت اثبات برتری آن نسبت به سایر روشها از نظر بهبود درصد تغییر شکل نسبی، در سالهای آتی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

### جمع بندی

عناصر نادر خاکی می‌توانند از طریق ترکیب شدن با گوگرد موجود در فولاد، از تشکیل سولفید منگنز

که در دمای تغییر فرم گرم قابلیت تغییر شکل زیادی دارد جلوگیری کرده و از این طریق مانع ایجاد ناهمگنی در خواص مکانیکی در جهات طولی و عرضی شوند. در عین حال اگر مقدار اضافه شده این عناصر از مقدار استوکیومتری لارم خیلی بیشتر شود، تاثیر معکوس آنها بر خواص مکانیکی از قبیل کاهش قابلیت تغییر طول نسبی از طریق انحلال در فولاد ممکن است ظاهر شود. مقایسه مقادیر قابلیت افزایش طول نسبی نمونه های ۱ تا ۴ و ۵ تا ۸ این موضوع را به وضوح آشکار می سازد. عناصر تشکیل دهنده کاربید و کاربونیترید از قبیل Nb و V می توانند از طریق مکانیزم انحلال جامد، ایجاد رسوبات ریز کاربیدی و کاربونیتریدی و جلوگیری از تبلور مجدد و رشد فازهای آستنیت و فریت بر خواص فولاد تاثیر گذاشته و مقاومت تسلیم، استحکام تسلیم، قابلیت تغییر طول و انرژی شکست را تغییر دهند. چنانچه مقدار این عناصر از حد معینی بیشتر شود، تاثیر معکوس آنها بر خواص مکانیکی به علت بزرگ شدن بیش از حد رسوبات و از بین رفتن ارتباط کریستالی آنها با زمینه ظاهر خواهد شد. میزان جذب این عناصر هنگام عملیات آلیاژ سازی تابع شرایط عمل به ویژه کنترل اتمسفر کوره بوده و نیاز به خبرگی و توجه زیادی دارد. به طوری که در صورت آلوده بودن محیط کار ورود ناخالصیهای جنبی، ممکن است نتایج مطلوب حاصل نشود. مکانیزم عمل عناصر میکرو آلیاژی نه تنها به آنالیز شیمیائی فولاد بلکه به تاریخچه عملیات مکانیکی و حرارتی انجام شده بر فولاد بستگی بسیار زیادی دارد به طوری نتیجه گیری در مورد نحوه عمل این عناصر نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه های ترمودینامیک و ستیک تحولات بین فازها و بافت داخلی و سطوح خارجی فازهای پایدار و رسوبات ریز دارد. این تحقیقات در حال حاضر همچنان ادامه دارد.

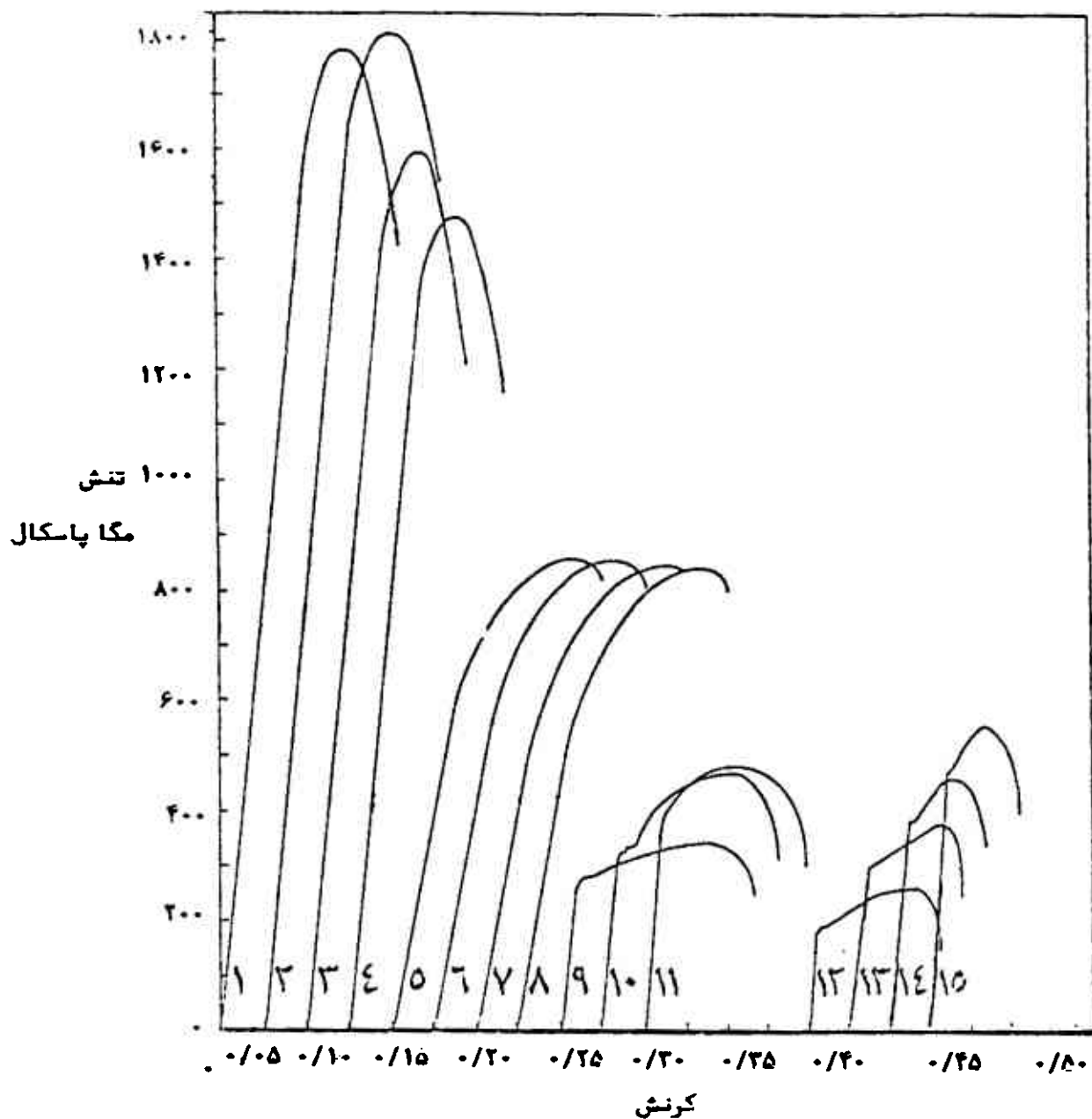
منابع و مآخذ:

۱- صدر نژاد، نوع، شکل و تاثیر ترکیبات گوگرد در فولاد " نشریه علمی و فنی وزارت معادن و فلزات، شماره ۳، ۱۳۶۷، ۲۶ - ۳۳.

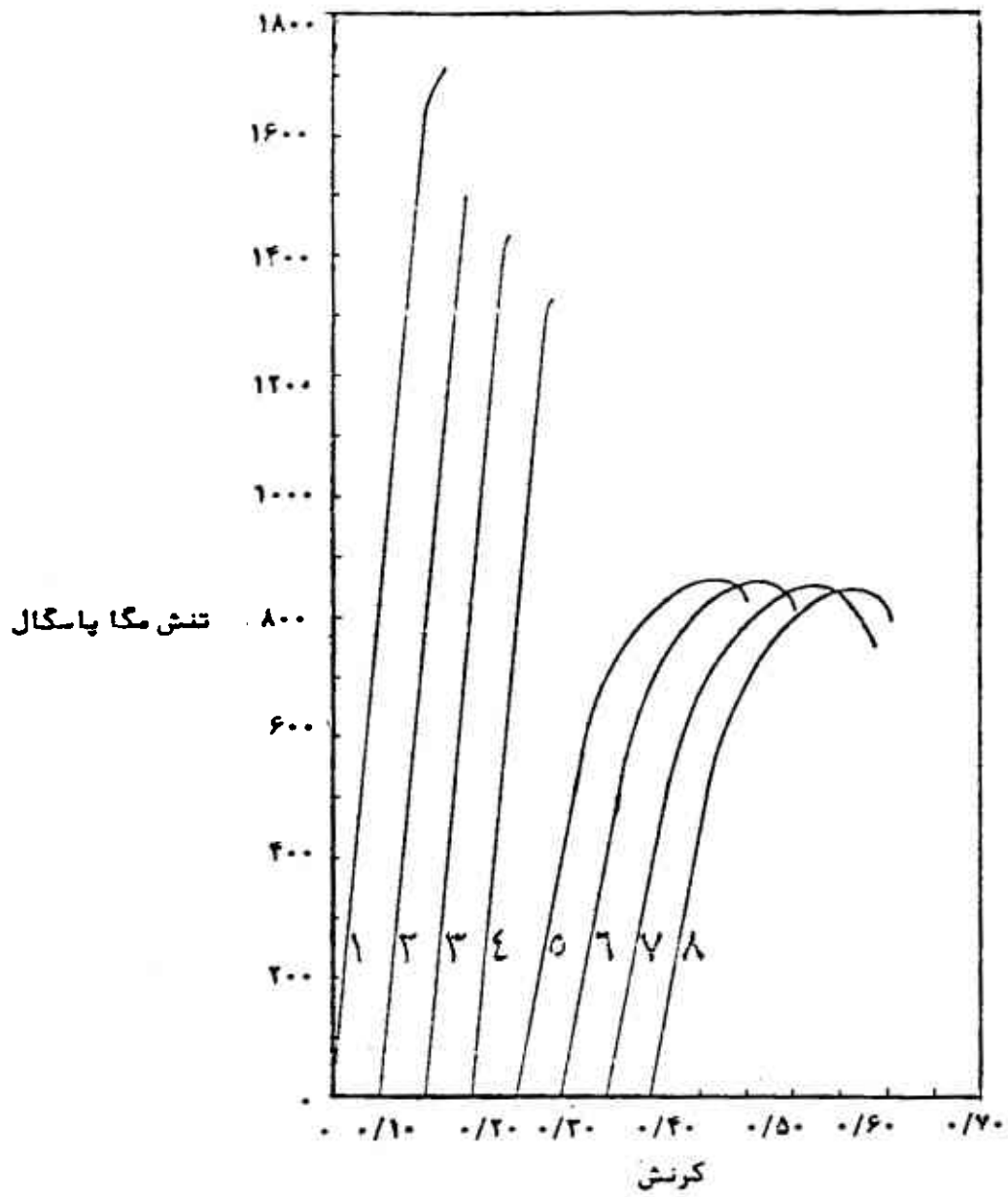
- 2-A. Mclean and D. Kay, " Control of Inclusions in High - Strength, Low - Alloy Steels ", (Paper Presented at Microalloying 75, Washington DC, 10 Oct 1975), 215.
- 3- R. Amin and F. Pickering , " Austenite Grain Coarsening and the Effect of Thermomechanical processing on Austenite Recrystallization" (Paper Presented at the conf. held in Pittsburgh, PA, 17 August 1981.)1.
- 4- S. Yamaoto, C. Ouchi and T. Osuka ".The Effect of Microalloying Elements On the Recovery and Recrystallization in Deformed Austenite", (Paper Presented at the same Conf. as Ref. 3), 613.
- 5- N. Shams, " Microstructure of Continuous Cooled Mniobium Steels, " Journal of Metals, 37(12)(1985 ), 21-24.
- 6- R. Kaspar and O. Pawelski, "Austenite Grain in the process of Thermomechanical Treatment," Steel Research, 57(5) (1986), 199-206.
- 7- I. Weiss, G. Fitzsimons, K. M. Tiitto and A. Deardo", The Influence of Niobium , V and N On the Response of Austenite to Reheating and Hot Deformation in 1 Microalloyed Steels" (Paper Presented at the same Conf. as Ref.), 33.
- 8 - K. Sadrnezhaad, F. Kashani Bozorg and S. Heshmati Manesh", Production of V and V-Nb Microalloyed Steels by plunging Technique and Investigation of Their Properties". Memoris of the Faculty of Engineering, Tehran Univ., 49(1989), 78.
- 9- K. Sadrnehaad, " Effect of Inoculation on Microstructure and properties of C- Mn " Steels, ( Submitted for publication in Recrystallization 90, Wollongong, Australia, 22 January 1990).
- 10- T. Hashimoto, H. Ohtani, T. Kobayashi, N. Hatano and S. Suzuki, " Controlled Rolling Practice of HSLA Steel at Extremely Low Temperature Finishing ", ( Paper Presented at the same Conf. as Ref. 3 ) 501

جدول ۱ ترکیب شیمیائی نمونه های فولادی

موسط ترکیب شیمیایی (درصدوزنی)														ردیف
P	S	Al	Nb	V	Nd	La	Ce	Ho	Ni	Cr	Mn	Si	C	
۰/۰۲۰	۰/۰۲۲	۰/۱۳	—	—	—	—	—	۰/۲۱۳	—	۱/۲۷	۱/-۲	-/۵۰	۰/۲۲	۱
۰/۰۲۶	۰/۰۱۸	۰/۱۲	—	—	۰/۰۱۱	۰/۰۱۶	۰/۰۲۲	۰/۲۰۲	—	۱/۲۹	۰/۹۲	-/۲۶	۰/۲۰	۲
-/۰۲۵	۰/۰۱۷	۰/۱۲	—	—	۰/۰۱۵	۰/۰۲۲	۰/۰۲۲	۰/۱۷۶	—	۰/۹۹	۰/۸۲	۰/۲۱	۰/۳۰	۳
۰/۰۲۳	۰/۰۲۰	۰/۱۲	—	—	۰/۰۱۸	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹	۰/۱۶۲	—	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۵۰	۰/۲۶	۴
۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	۰/۱۰	—	۰/۱۲	—	—	—	۰/۳۱۰	۱/۷۵	۱/۲۰	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۲۸	۵
۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	۰/۱۰	—	۰/۱۲	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲	۰/۰۲۸	۰/۳۱۰	۱/۷۵	۱/۲۰	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۲۸	۶
۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	۰/۱۰	—	۰/۱۲	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	۰/۰۶۰	۰/۳۱۰	۱/۷۵	۱/۲۰	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۲۸	۷
۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	۰/۱۰	—	۰/۱۲	۰/۰۲۶	۰/۰۲۷	۰/۰۷۲	۰/۳۱۰	۱/۷۵	۱/۲۰	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۲۸	۸
۰/-۱۶	۰/۰۳۱	—	—	—	—	—	—	—	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۲۶	—	۰/۰۲۲	۹
۰/۰۱۵	۰/۰۲۲	—	—	۰/۰۶	—	—	—	—	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۲۵	—	۰/۰۲۹	۱۰
۰/۰۱۵	۰/۰۲۰	—	۰/۰۲۵	۰/۱۲	—	—	—	—	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۲۱	—	۰/۰۲۲	۱۱
۰/۰۱۰	۰/۰۲۲	—	—	—	—	—	—	—	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۲۲	—	۰/۱۲۰	۱۲
۰/۰۱۰	۰/۰۲۲	—	—	۱/۱۲	—	—	—	—	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۸۵	—	۰/۱۲۰	۱۳
۰/۰۱۱	۰/۰۲۰	—	۰/۱۲	۰/۱۸	—	—	—	—	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۲۲	—	۰/۱۳۰	۱۴
۰/-۱۱	۰/۰۱۹	—	۰/۲۲	۰/۲۲	—	—	—	—	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۸۹	۰/۰۲	۰/۱۲۰	۱۵

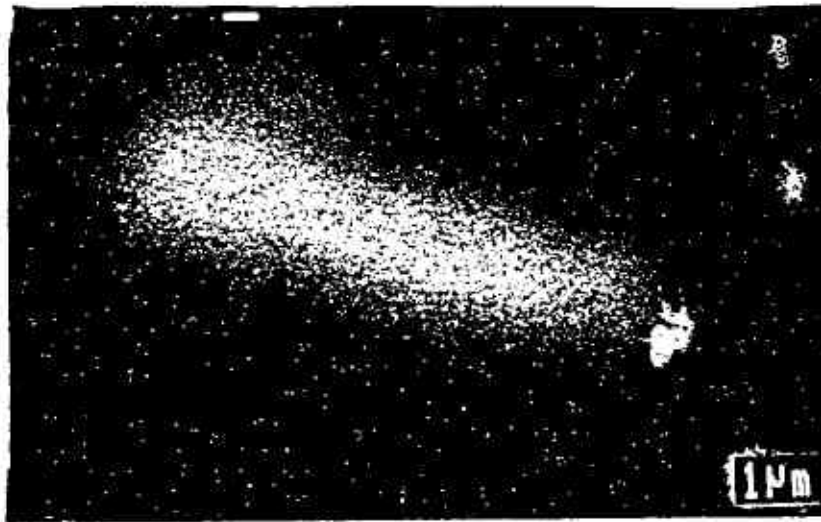


شکل ۱ دیاگرامهای تنش کرنش نمونه های فولادی در جهت طولی



شکل ۲ دیاگرامهای تنش کرنش نمونه‌های فولادی در جهت عرضی

شکل ۳ تاثیر عملیات آهنگری بر شکل رسوب ترکیبات گوگرد



الف طویل شدن رسوب MnS در نمونه تلقیح نشده شماره ۱



ب گرد ماندن سولفید عناصر نادر خاکی در نمونه تلقیح شده شماره ۳  
نقاط سفید نشان دهنده عنصر گوگرد به صورت آزاد و یا ترکیب است.