

## لینک های مفید



عضویت  
در خبرنامه



کارگاه های  
آموزشی



سرویس  
ترجمه تخصصی  
STRS



فیلم های  
آموزشی



بلاگ  
مرکز اطلاعات علمی



سرویس های  
ویژه



## سمپوزیوم فولاد ۹۱

۱ و ۲ اسفندماه ۱۳۹۱  
اهواز، شرکت فولاد خوزستان



### رفتار مکانیکی فولاد TWIP در آزمایش پیچشی نرخ کرنش بالا

علی خسروی فرد<sup>۱</sup>، محمد محسن مشکسار، رامین ابراهیمی  
بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

#### چکیده

فولادهای با استحکام بالای پیشرفته به دلیل خواص مکانیکی بسیار خوب، اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. گروه نوینی از این فولادها به نام فولادهای با پلاستیسیته ناشی از دوقلویی (TWIP)، به دلیل داشتن ترکیب منحصر به فردی از استحکام و چکش‌خواری، مورد توجه هستند. فولادهای TWIP، استحکام و چکش‌خواری خود را در نرخ کرنش‌های زیاد نیز حفظ می‌کنند. به منظور استفاده از این آلیاژها در نرخ کرنش‌های بالا، آزمون‌های مکانیکی لازم جهت سنجش خواص آنها نیز باید در محدوده نرخ کرنش‌های بالا انجام پذیرد. آزمایش پیچشی کلسکی از نقطه نظر نوع موج کرنشی با نرخ بالا و دقت نتایج حاصل شده از سایر روش‌های کنونی آزمایش مواد در نرخ کرنش بالا برتر می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا یک ماشین پیچشی با نرخ کرنش بالا طراحی و ساخته شد. سپس رفتار مکانیکی فولادهای TWIP پرمگنز به کمک آزمایش‌های پیچشی نرخ کرنش بالا در محدوده ۵۰۰ تا ۱۷۰۰ بر ثانیه تعیین شد. در این رابطه تأثیر وجود پیش‌کرنش در نمونه‌های مورد آزمایش نیز بررسی گردید.

**کلمات کلیدی:** آزمایش پیچش، نرخ کرنش بالا، فولاد TWIP، پیش‌کرنش

<sup>1</sup> akhosravi@shirazu.ac.ir

## مقدمه

موارد متعددی از کاربرد مواد تحت شرایط بارگذاری با نرخ کرنش بالا را می‌توان نام برد. یکی از مثال‌های شناخته شده اعمال بارهای ضربه‌ای به ماده، بدنه اتومبیل در حال تصادف است. لذا به منظور افزایش ایمنی، لازم است ماده‌ای با بیشینه ضربه‌پذیری<sup>۱</sup> برای این کاربرد مورد استفاده قرار گیرد [۱]. بدیهی است که سنجش خصوصیات مکانیکی یک ماده برای استفاده در چنین کاربرهائی باید در همان محدوده نرخ کرنش بالای کاربرد مورد نظر انجام پذیرد. با الهام‌گیری از نوآوری John Hopkinson [۲]، روش‌های متعددی برای آزمایش مواد در نرخ کرنش‌های زیاد ابداع شده است. به منظور مطالعه رفتار مکانیکی مواد چکش‌خوار در نرخ کرنش‌های زیاد، Kolsky [۳] موفق به ساخت میله فشاری موسوم به هاپکینسون شد. در حدود یک دهه بعد، با اعمال تغییراتی در دستگاه کلسکی، امکان انجام آزمایش‌های کششی در نرخ کرنش زیاد نیز فراهم گردید [۴]. سرانجام Baker و Yew [۵] اولین کسانی بودند که بر مبنای تکنیک کلسکی، آزمایش پیچشی با نرخ کرنش بالا را برای مطالعه رفتار دینامیک مواد ابداع کردند.

از سوی دیگر فولادهای با استحکام بالای پیشرفته (AHSS<sup>۲</sup>) به دلیل خصوصیات مکانیکی مطلوب خود مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته‌اند. فولادهای با پلاستیسیته ناشی از دوقلوبی (TWIP<sup>۳</sup>) که جزء جدیدترین فولادهای AHSS می‌باشند، به دلیل داشتن ترکیب بهینه‌ای از استحکام و چکش‌خواری، از جذابیت بالایی برخوردارند. به ویژه این فولادها، استحکام و چکش‌خواری خود را در نرخ کرنش‌های زیاد نیز حفظ می‌کنند [۶] و از این رو به عنوان کاندیدی مناسب جهت استفاده در بدنه اتومبیل‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. بین ۱۵ تا ۳۰wt% منگنز به منظور حفظ پایداری فاز آستنیت در دمای اتاق، در ترکیب شیمیایی این فولادها وجود دارد. علاوه بر این در مواردی، درصد اندکی آلومینیوم و سیلیسیوم نیز جهت تنظیم اندازه انرژی نقص انباشتگی<sup>۴</sup> آنها به ترکیب این فولادها افزوده می‌شود. انرژی نقص انباشتگی یک فولاد آستنیتی باید در محدوده ۱۵ تا ۴۰ mj/m<sup>2</sup> باشد تا دوقلوبی به عنوان مکانیزم غالب در حین تغییرشکل ماده مطرح گردد [۷]. دوقلوبی‌های مکانیکی که به صورت موانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند، کارسختی بالای فولاد TWIP و در نتیجه مقاومت زیاد در برابر موضعی شدن کرنش را در پی دارند [۸]. اخیراً مرور جامعی بر تحقیقات مرتبط با ویژگی‌های ریزساختاری فولاد TWIP و خواص مکانیکی آن توسط Bouaziz و همکارانش [۹] صورت گرفته است. اما با نگاهی به این تحقیقات، روشن است که رفتار مکانیکی فولاد TWIP در نرخ کرنش‌های زیاد، به ندرت مورد بررسی

<sup>1</sup> Crashworthiness

<sup>2</sup> Advanced High Strength Steel

<sup>3</sup> Twinning Induced Plasticity

<sup>4</sup> Stacking Fault Energy (SFE)

قرار گرفته است. به خصوص، تا جایی که نویسندگان این مقاله اطلاع دارند، رفتار دینامیکی این فولاد در شرایط پیچشی تاکنون مورد مطالعه قرار گرفته نشده است.

در این تحقیق، ابتدا یک دستگاه آزمایش پیچشی نرخ کرنش بالا طراحی و ساخته شد. سپس آزمایش‌های پیچشی بر روی نمونه‌هایی از فولادهای TWIP با مقادیر متفاوت کرنش صورت پذیرفت. اثر وجود پیش‌کرنش بر رفتار دینامیکی فولاد TWIP نیز مورد آزمایش قرار گرفت.

## روش تحقیق

اگرچه به دلیل ارزانی و سهولت ساخت نمونه، آزمایش‌های فشاری از رواج بیشتری برخوردارند، لیکن دقت نتایج آزمایش‌های پیچشی با نرخ کرنش زیاد از آزمایش‌های فشاری بالاتر است [۱۰]. تصویر شماتیکی از دستگاه آزمایش پیچشی که در این تحقیق طراحی و ساخته شد در شکل ۱ مشاهده می‌گردد. جهت انجام آزمایش، نگهدارنده ۲ فعال شده و میله انتقال بار توسط سیستم موتور و گیربکس، تا زاویه مشخصی چرخانده می‌شود. به این ترتیب، گشتاور پیچشی در میله انتقال بار در فاصله مابین گیربکس و نگهدارنده ۲ ذخیره می‌گردد. در این لحظه، نگهدارنده ۱ فعال شده و نگهدارنده ۲ با شکستن پین شیاردار خود، به سرعت آزاد می‌گردد. در نتیجه نیمی از گشتاور ذخیره شده، به نمونه آزمایش و نیم دیگر به نگهدارنده ۱ منتقل می‌گردد. نگهدارنده ۱ با منعکس کردن این گشتاور، از اعمال آن به دنده‌های گیربکس و آسیب احتمالی به آن جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر قسمتی از گشتاور اعمال شده به نمونه آزمایش از آن عبور کرده و به میله عبوری وارد می‌شود و قسمتی نیز به میله انتقال بار باز می‌گردد. مقادیر کرنش‌های ایجادشده در هر یک از دو میله در طول آزمایش به وسیله کرنش‌سنج‌های ۱ و ۲ به طور پیوسته اندازه‌گیری شده و توسط یک کارت دریافت داده<sup>۱</sup> با سرعت بالا ذخیره می‌شود. لازم به توضیح است که به منظور افزایش حساسیت اندازه‌گیری کرنش، بر روی هر یک از دو میله، یک پل وستون کامل شامل چهار عدد کرنش‌سنج مقاومتی نصب گردیده است.

دو فولاد پرمنگنز با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ جهت نمونه‌سازی به کار گرفته شدند. هر دو فولاد، به صورت شمش‌های ریختگی به ابعاد  $۶۰ \times ۸۰ \times ۳۵۰$  میلی‌متر دریافت شدند. قبل از نمونه‌سازی، شمش‌ها در دمای  $۱۱۰۰$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت آنیل شدند. تصویر نمونه آزمایش و نقشه ابعاد آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است به منظور جلوگیری از لغزش بین نمونه و میله‌ها محل‌های تماس نمونه با میله‌ها به صورت شش ضلعی ساخته شد. با توجه به مشکل بودن ماشین‌کاری سنتی فولادهای پرمنگنز آستنیتی به دلیل کارسختی شدید آنها و نیز به منظور

<sup>1</sup> Data Acquisition (DAQ)

حصول دقت ابعادی بالا، ساخت این نمونه‌ها به روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup> انجام پذیرفت. طول ناحیه سنجه که در شکل با  $l$  نشان داده شده است از پارامترهای تعیین کننده نرخ کرنش اعمال شده در آزمایش می‌باشد. لذا جهت مطالعه اثر نرخ کرنش بر رفتار فولاد، مقادیر متفاوتی (۱، ۲ و ۳ میلی‌متر) برای بعد  $l$  در نظر گرفته شد.

اندازه زاویه پیچش در هر آزمایش باید به گونه‌ای انتخاب گردد که از رسیدن میله انتقال بار به حد تسلیم اجتناب شود. با توجه به خصوصیات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 که جهت ساخت میله‌های انتقالی و عبوری مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از قانون هوک، بیشینه زاویه مجاز پیچش،  $27^\circ$  محاسبه گردید. لیکن به منظور رعایت ایمنی دستگاه، بیشینه زاویه پیچش اعمال شده در آزمایش‌ها،  $18^\circ$  انتخاب شد.

تفاوت سرعت زاویه‌ای دو انتهای نمونه آزمایش، مشخص کننده نرخ کرنش اعمال شده به نمونه است. از طرفی، تفاوت سرعت زاویه‌ای دو انتهای نمونه به طور مستقیم با پالس کرنشی بازگشت یافته به میله انتقال بار مرتبط است. لذا جهت محاسبه نرخ کرنش برشی اعمال شده به نمونه، طبق رابطه (۱)، از کرنش بازگشتی که توسط پل و تستون ۱ اندازه گیری شده است استفاده گردید [۱۰]:

$$\dot{\gamma}_s(t) = \frac{2r_s c}{L_s r_b} \times (-\gamma_R(t)) \quad (1)$$

در این رابطه  $r_s$  شعاع متوسط ناحیه سنجه نمونه،  $L_s$  طول ناحیه سنجه،  $c$  سرعت انتشار موج کرنشی در میله انتقال بار،  $r_b$  شعاع میله انتقال بار و  $\gamma_R(t)$  اندازه پالس کرنش برشی بازگشت یافته به میله انتقال بار در هر لحظه از زمان است. با انتگرال گیری از نرخ کرنش برشی (رابطه (۱)) بر حسب زمان می‌توان کل کرنش برشی اعمال شده به نمونه آزمایش تا هر لحظه از زمان را محاسبه نمود:

$$\gamma_s(t) = \int_0^t \dot{\gamma}_s(t) dt \quad (2)$$

در نهایت با توجه به این موضوع که مقدار گشتاوری که نمونه آزمایش در هر لحظه از زمان تحمل کرده است به میله عبوری انتقال می‌یابد، می‌توان با استفاده از کرنش اندازه گیری شده توسط پل و تستون ۲ در میله عبوری، تنش برشی اعمال شده به نمونه آزمایش را نیز اندازه گیری کرد [۱۰]:

$$\tau_s = G\gamma_T \frac{J_b}{J_s} \cdot \frac{r_s}{r_b} = \frac{Gr_b^3}{4r_s^2 t_s} \gamma_T \quad (3)$$

در این رابطه  $J_b$  و  $J_s$  به ترتیب ممان اینرسی قطبی در میله عبوری و نمونه آزمایش،  $\gamma_T$  اندازه پالس کرنشی وارد شده به میله عبوری،  $G$  مدول برشی الاستیک و  $t_s$  ضخامت ناحیه سنجه در نمونه آزمایش

<sup>1</sup> Electrical Discharge Machining (EDM)

است. با استفاده از روابط (۲) و (۳) مقادیر تنش و کرنش برشی در یک بازه زمانی ثابت محاسبه می‌گردد و آنگاه می‌توان با حذف پارامتر زمان، منحنی‌های تنش برشی بر حسب کرنش برشی را ترسیم نمود. همچنین با ضرب کردن مقادیر تنش برشی در  $\sqrt{3}$  و تقسیم کردن اندازه کرنش برشی بر  $\sqrt{3}$  می‌توان مقادیر تنش و کرنش مؤثر را محاسبه و ترسیم کرد.

جهت بررسی اثر پیش‌کرنش بر رفتار دینامیکی فولاد، آزمایش‌های پیچشی دو مرحله‌ای انجام پذیرفت. در مرحله اول، بدون فعال‌سازی نگهدارنده‌ها، میله انتقالی به آرامی تا زاویه مشخصی چرخیده و به عبارتی مقداری کرنش با نرخ پایین به نمونه وارد می‌کند. اندازه زاویه پیچش اولیه در این آزمایش‌ها به گونه‌ای انتخاب گردید که پیش‌کرنشی معادل  $0/15$  به نمونه اعمال گردد. سپس مطابق روش گفته شده فوق، آزمایش با نرخ کرنش بالا بر روی نمونه تغییرشکل یافته انجام پذیرفت.

### نتایج و بحث

نمودارهای تنش-کرنش حاصل از آزمایش‌های پیچشی نرخ کرنش بالا که بر روی دو فولاد پرمگنتر (معرفی شده در جدول ۱) انجام پذیرفت در شکل ۳ مشاهده می‌گردد.

اولاً با مقایسه منحنی‌های سیلان فولادهای ۱ و ۲ در نرخ کرنش‌های تقریباً یکسان، روشن است که تنش سیلان فولاد ۲ از فولاد ۱ بالاتر است. این موضوع به ویژه در نرخ کرنش‌های پایین‌تر تشدید گردیده است. تفاوت تنش سیلان دو فولاد را می‌توان به تفاوت فازهای موجود در ریزساختار اولیه آنها مرتبط دانست. فولاد ۱ دارای ساختار  $100\%$  آستنیتی است در حالی که فولاد ۲ حاوی ساختار دوفازی آستنیت+مارتنزیت اپسیلون می‌باشد. با توجه به سختی بیشتر فاز مارتنزیت، فولاد ۲ استحکام بالاتری نشان داده است. از آنجا که فازهای پایدار هر دو فولاد در دمای اتاق و نیز تغییرات ریزساختاری آنها در حین تغییرشکل به اندازه انرژی نقص چیده شدن آنها بستگی دارد، مقادیر این انرژی در هر دو فولاد با استفاده از داده‌های ترمودینامیکی موجود در مرجع ۱۱ و به روش Olson و Cohen [۱۲] محاسبه گردید. این مقادیر برای فولادهای ۱ و ۲ به ترتیب  $32/2$  و  $4/7$   $\text{mJ/m}^2$  بود. لذا انتظار می‌رود که در حین تغییرشکل در دمای اتاق، فولاد ۱ بیشتر تمایل به تشکیل دوقلویی داشته باشد. در مقابل، با توجه به پایین بودن انرژی نقص چیده شدن در فولاد ۲، تبدیل آستنیت به مارتنزیت اپسیلون در این فولاد محتمل‌تر خواهد بود. لیکن تغییرشکل یک ماده با نرخ کرنش بالا، افزایش دمای آدیاباتیک<sup>۱</sup> آن ماده را به همراه دارد. از طرفی افزایش دما باعث افزایش انرژی نقص چیده شدن و در نتیجه تغییر رفتار فولاد در حین تغییرشکل خواهد شد. بسته به اندازه کرنش و نرخ کرنش در یک فولاد آستنیتی، بین  $50^\circ\text{C}$  تا  $100^\circ\text{C}$  افزایش دمای آدیاباتیک

<sup>1</sup> Adiabatic heating

در حین تغییر شکل نرخ کرنش بالا می‌تواند رخ دهد [۱۳]. بر این اساس می‌توان استدلال کرد که افزایش دمای آدیاباتیک در فولاد ۱، انرژی نقص چیده شدن آن را به اندازه‌ای می‌رساند که مکانیزم غالب تغییر شکل، به جای دوقلویی شدن، لغزش نابجایی‌ها خواهد بود. در نتیجه افزایش نرخ کرنش، آن‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، افزایش تنش سیلان را به دنبال داشته است. این رفتار که به طور معمول در اکثر آلیاژها دیده می‌شود، به کاهش تحرک نابجایی‌ها در نرخ کرنش‌های زیاد و نیز افزایش اثر کشش گرانو<sup>۱</sup> عناصر آلیاژی در برابر حرکت نابجایی‌ها نسبت داده شده است. مورد اخیر، به ویژه در نرخ کرنش‌های بالای ۱۰۰۰/s قابل توجه خواهد بود. از طرف دیگر در فولاد ۲، علیرغم افزایش انرژی نقص چیده شدن به دلیل افزایش دمای آدیاباتیک، این انرژی همچنان در محدوده‌ای که دوقلویی‌های قابل توجهی تشکیل می‌شوند باقی می‌ماند. اما افزایش نرخ کرنش در این فولاد، افزایش دمای آدیاباتیک و در نتیجه افزایش انرژی نقص چیده شدن را در پی دارد که می‌تواند به کاهش چگالی دوقلویی‌های تشکیل شده و در نتیجه کاهش کارسختی و تنش سیلان بیانجامد. لیکن، همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است، کاهش تنش سیلان فولاد با افزایش نرخ کرنش در اولین مراحل تغییر شکل پلاستیک نیز نمود پیدا کرده است. با توجه به اینکه در کرنش‌های کوچک، اثر افزایش دمای آدیاباتیک قابل ملاحظه نیست این موضوع را می‌توان به دو مورد دیگر مربوط دانست: اولاً دوقلویی‌های کربن-منگنز در ممانعت از حرکت نابجایی‌ها در این فولاد نقش مهمی ایفا می‌کنند که معمولاً تحت عنوان پیر کرنشی دینامیکی<sup>۲</sup> مورد بحث قرار می‌گیرد. با افزایش نرخ کرنش، این قابلیت دوقلویی‌های مذکور کاهش می‌یابد. ثانیاً زمانی که نرخ کرنش افزایش می‌یابد فشار ضربه<sup>۳</sup> وارد شده به نمونه از تنش بحرانی برای جوانه زنی دوقلویی‌ها بیشتر شده و تنش تسلیم را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد [۶]. نتایج به دست آمده همچنین با توجه به نمودارهای نرخ کارسختی ( $d\sigma/d\varepsilon$ ) نیز قابل توضیح هستند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است، نرخ کارسختی برای فولاد ۱، به طور پیوسته روندی کاهشی دارد. اما برای فولاد ۲ در نرخ کرنش‌های ۵۱۶ و ۸۹۲ بر ثانیه، افزایش نرخ کارسختی در مقادیر خاصی از کرنش دیده می‌شود. افزایش نرخ کارسختی در این فولاد معمولاً نشان‌دهنده آغاز جوانه‌زنی قابل ملاحظه دوقلویی‌های مکانیکی است. در مقایسه با آزمایش انجام شده در نرخ کرنش ۵۱۶/s، افزایش نرخ کارسختی در نرخ کرنش ۸۹۲/s به ازاء مقادیر بزرگتری از کرنش اتفاق افتاده است. این موضوع را می‌توان به کوتاهتر بودن زمان پالس<sup>۴</sup> در آزمایش با نرخ کرنش بالاتر نسبت داد که در نتیجه آن مقادیر بزرگتری از کرنش برای فعال شدن سیستم‌های دوقلویی مورد نیاز خواهند بود [۶]. همچنین مشاهده

<sup>1</sup> Viscous drag

<sup>2</sup> Dynamic strain aging (DSA)

<sup>3</sup> Impact pressure

<sup>4</sup> Pulse duration

می‌گردد که برای نرخ کرنش  $892/s$ ، تغییرات شدید در شیب منحنی کارسختی در دو مرحله اتفاق افتاده است. این موضوع می‌تواند به دلیل جوانه‌زنی سیستم‌های ثانویه دوقلویی در ماده باشد که به دلیل محدودیت حرکت نابجایی‌ها در نرخ کرنش‌های بالاتر رخ می‌دهد؛ اما با افزایش نرخ کرنش به  $1709/s$ ، نرخ کارسختی در طول آزمایش به طور پیوسته کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که افزایش دمای آدیاباتیک باعث غالب شدن مکانیزم نرم شدن حرارتی و کاهش دانسیته دوقلویی‌های تشکیل شده گردیده است. شایان ذکر است که افزایش دمای آدیاباتیک با افزایش نرخ کرنش از  $700$  تا  $2500$  بر ثانیه در آزمایش‌های فشاری که توسط Xiong و همکارانش انجام گردید، نیز قابل ملاحظه بوده است.

به منظور بررسی اثر پیش‌کرنش بر رفتار دینامیکی فولاد، همان‌گونه که در قسمت روش تحقیق توضیح داده شد، ابتدا کرنشی به اندازه  $0/15$  با نرخ پایین (شرایط شبه استاتیک) به نمونه‌هایی از فولاد ۲ اعمال شد و سپس نمونه‌های تغییرشکل یافته، تحت آزمایش با نرخ بالا قرار گرفتند. با مقایسه نرخ کارسختی در نمونه‌های دارای پیش‌کرنش (شکل ۵) با نمونه‌های بدون پیش‌کرنش، روشن است که تأثیر تشکیل دوقلویی‌ها کمتر شده و تغییرات شیب منحنی در مقادیر کوچک‌تری از نرخ کارسختی رخ داده است. با توجه به کوچک بودن انرژی نقص چیده شدن در فولاد ۲، پیش‌کرنشی که در شرایط شبه استاتیک به این ماده اعمال گردیده کسر قابل توجهی از آستنیت موجود در ساختار فولاد را به مارتنزیت اپسیلون تبدیل کرده است. لذا در آزمایش با نرخ کرنش بالا که متعاقباً روی این نمونه‌ها اجرا گردیده، کسر کوچکتری از ساختار ماده همچنان آستینیتی است و امکان دوقلویی شدن دارد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک دستگاه آزمایش پیچشی با نرخ کرنش بالا طراحی و ساخته شد و با موفقیت برای آزمایش نمونه‌هایی از فولادهای پرمگنز در محدوده نرخ کرنش حدود  $500$  تا  $1700/s$  مورد استفاده قرار گرفت. در فولاد با غلظت کربن بالاتر به دلیل انرژی نقص چیده شدن بیشتر، افزایش دمای آدیاباتیک نمونه به طور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش کارسختی فولاد گردید. این در حالی است که در فولاد کم کربن با انرژی نقص چیده شدن کمتر، علیرغم افزایش دمای آدیاباتیک، تشکیل دوقلویی‌ها تا نرخ کرنش حدود  $900/s$  به شکل مؤثری اتفاق افتاده است. اعمال پیش‌کرنش شبه استاتیک به فولاد کم کربن باعث کاهش کسر آستنیت باقیمانده در فولاد و در نتیجه کاهش دانسیته دوقلویی‌های تشکیل شده در حین آزمایش با نرخ کرنش بالا می‌گردد.

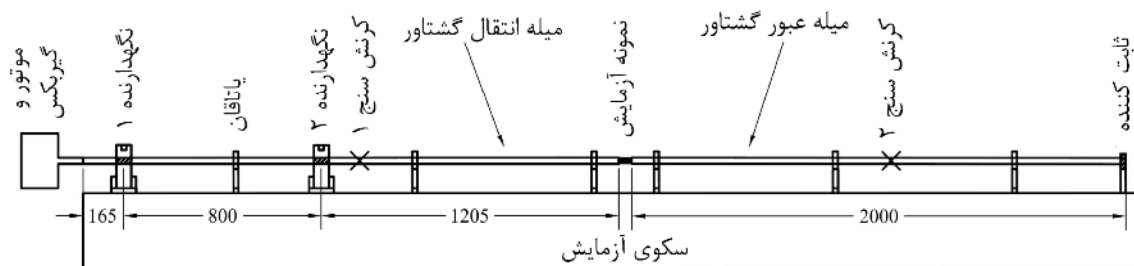


## مراجع

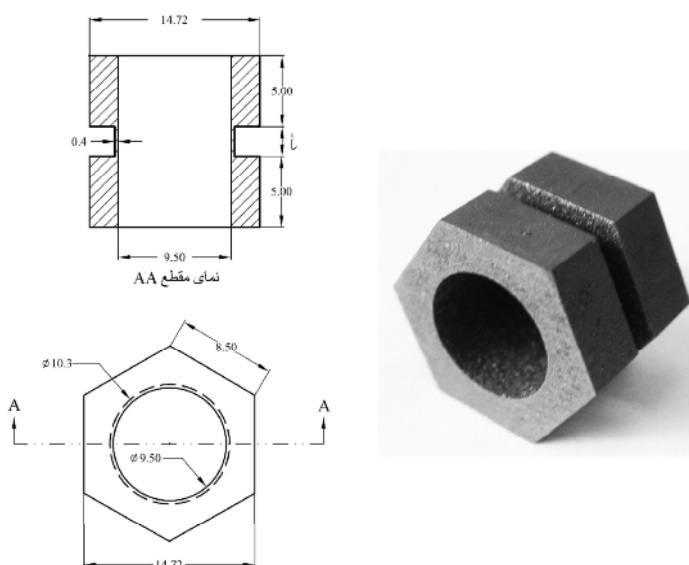
- [1] Y. Li, Z. Lin, A. Jiang, G. Chen, "Use of high strength steel sheet for lightweight and crashworthy car body", *Materials and Design* 2003; 24: 177-182.
- [2] J. Hopkinson, "Original Papers by J. Hopkinson", Vol. 2, Cambridge: At the University Press 1901, 316-324.
- [3] H. Kolsky, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading", *Proceedings of the Physical Society* 1949; 62: 676-700.
- [4] J. Harding, E.O. Wood, J.D. Campbell, "Tensile Testing of Materials at Impact Rates of Strain", *Journal of Mechanical Engineering Science* 1960; 2: 88-96.
- [5] W.W. Baker, C.H. Yew, "Strain Rate Effects in the Propagation of Torsional Plastic Waves", *Journal of Applied Mechanics* 1966; 33: 917-923.
- [6] Z. Xiong, X. Ren, W. Bao, S. Li, H. Qu, "Dynamic mechanical properties of the Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP steel after different heat treatments", *Materials Science and Engineering A*, 2011; 530: 426-431.
- [7] D.B. Santos, A.A. Saleh, A. Azdiar, A. Carman, D.M. Duarte, É.A.S. Ribeiro, B.M. Gonzalez, E.V. Pereloma, "Effect of annealing on the microstructure and mechanical properties of cold rolled Fe-24Mn-3Al-2Si-1Ni-0.06C TWIP steel", *Materials Science and Engineering A*, 2011; 528: 3545-3555.
- [8] G. Dini, A. Najafizadeh, R. Ueji, S.M. Monir-Vaghefi, "Tensile deformation behavior of high manganese austenitic steel: The role of grain size", *Materials and Design*, 2010; 31: 3395-3402.
- [9] O. Bouaziz, S. Allain, C.P. Scott, P. Cugy, D. Barbier, "High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: a review of the microstructure properties relationships", *Current Opinions in Solid State and Materials Science*, 2011; 15: 141-168.
- [10] A. Gilat, "Torsional Kolsky Bar Testing", *Mechanical Testing*, Vol. 8, ASM Handbook, Materials Park: ASM International, 2000, 1134-1162.
- [11] A. Dumay, J.P. Chateau, S. Allain, S. Migot, O. Bouaziz, "Influence of addition elements on the stacking-fault energy and mechanical properties of an austenitic Fe-Mn-C steel", *Materials Science and Engineering A* 2008; 483-484: 184-187.
- [12] G.B. Olson, M. Cohen, "A general mechanism of martensitic nucleation: Part I. General concepts and the FCC  $\rightarrow$  HCP transformation", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1976; 7: 1897-1904.
- [13] P. Larour, P. Verleysen, M. Vermeulen, M. Gomes, A. Wedemeier, J.L. Geoffroy, W. Bleck, "Influence of pre-straining and microstructure on the dynamic properties of high strength steels", *Proceedings of the MS&T conference* (2004).

جدول ۱. درصد وزنی عناصر موجود در فولادهای آستنیتی مورد استفاده در این تحقیق

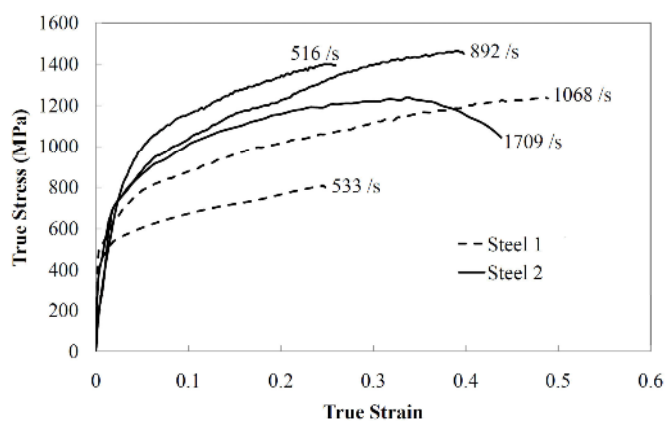
Si	Al	Mn	C	آلیاژ
۲/۷	۰/۸	۲۱/۶	۰/۴۹	فولاد ۱
۲/۱	۰/۶	۲۰/۱	۰/۰۷	فولاد ۲



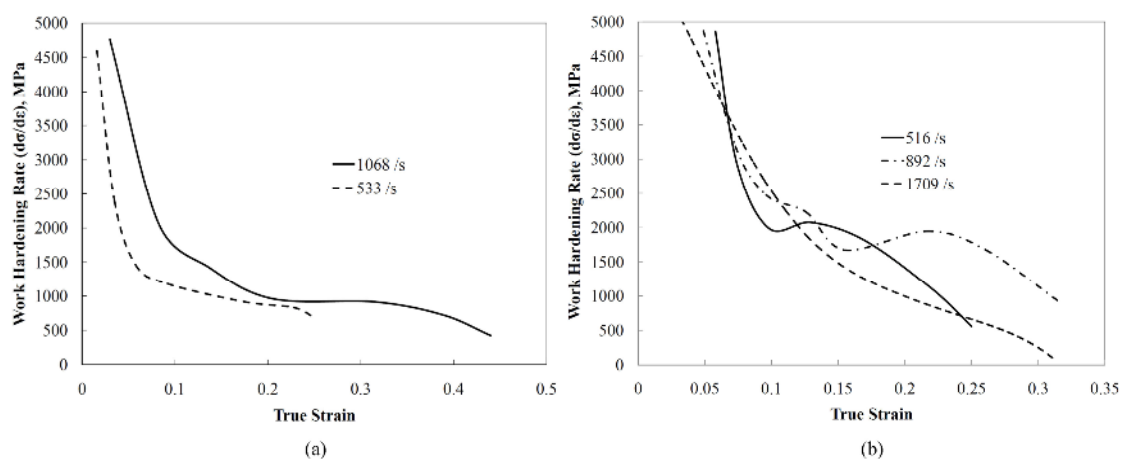
شکل ۱. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش پیچشی با نرخ کرنش زیاد (کلیه ابعاد بر حسب میلی متر).



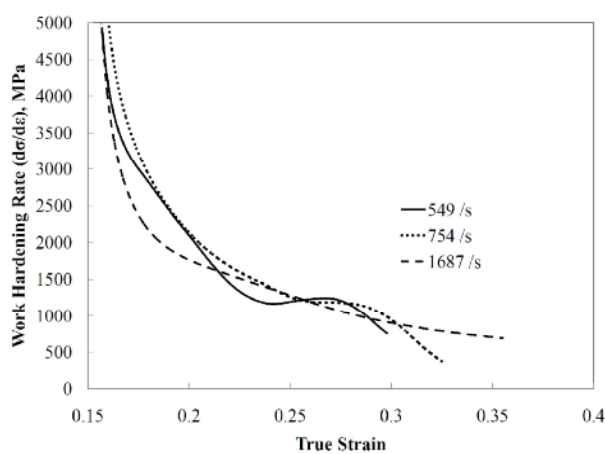
شکل ۲. نمونه آزمایش پیچشی با نرخ کرنش بالا (کلیه ابعاد بر حسب میلی متر).



شکل ۳. نمودارهای تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش‌های پیچشی نرخ کرنش بالا.



شکل ۴. نمودارهای نرخ کارسختی در آزمایش‌های پیچشی نرخ کرنش بالا بر روی فولاد ۱ و (b) فولاد ۲.



شکل ۵. نمودار نرخ کارسختی در آزمایش‌های پیچشی نرخ کرنش بالا بر روی نمونه‌های فولاد ۲ با پیش‌کرنش ۰/۱۵.

## لینک های مفید



عضویت  
در خبرنامه



کارگاه های  
آموزشی



سرویس  
ترجمه تخصصی  
STRS



فیلم های  
آموزشی



بلاگ  
مرکز اطلاعات علمی



سرویس های  
ویژه