



## بررسی عددی و آزمایشگاهی فرایند سختکاری انفجاری روی سوزن‌های ریل راه آهن

غلامحسین لیاقت<sup>۱\*</sup>، سید علی طباطبائی قمی<sup>۲</sup>، مرتضی آقائی<sup>۳</sup>، حمیدرضا حفیظی اتابک<sup>۴</sup>، کیوان نصرت زادگان<sup>۴</sup>، محمدتقی رحیمی نژاد<sup>۵</sup>، سحر صادقی<sup>۵</sup>

- ۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 ۲- دانشیار، گروه پژوهشی شکلدهی مواد فلزی، جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، تهران  
 ۳- دکتری، دانشکده شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 ۴- دکتری، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران  
 ۵- کارشناسی ارشد، گروه پژوهشی شکلدهی مواد فلزی، جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، تهران  
 \* تهران ۱۱۱-۱۴۱۱۵، ghlia530@modares.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

سوزن‌های ریل راه آهن یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیستم حمل و نقل ریلی است. چراکه آنها اجازه اتصال دو مسیر مختلف از مسیر را می‌دهند و همین امر باعث انعطاف‌پذیری و آسانی کار می‌شود. اما به دلیل نیروی‌های تماسی و ضربه‌ای به هنگام تعویض مسیر توسط سوزن‌ها، فرسایش و خوردگی فراوانی در آنها وجود می‌آید که علاوه بر تحمیل هزینه‌های تعویض، به قسمت‌های دیگر واگن‌ها نیز آسیب وارد کرده و خسارات را دوچندان می‌کند. پس برای جلوگیری از تغییر شکل‌های پلاستیک و خوردگی تحت بارهای ضربه‌ای و سیکلی، باید مقاومت سطح سوزن افزایش پیدا کند. طبق استانداردهای موجود، سختی سطح ریل راه آهن بویژه در محل سوزن‌های مربوطه باید به طور متوسط بین ۳۲۰-۳۹۰ HB باشد. در پژوهش حاضر، پس از محاسبه مقدار انرژی لازم جهت سختکاری انفجاری از طریق تحلیل عددی و صحت‌سنجی نتایج در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، بررسی پارامتریک صورت گرفته است. نتایج تحلیل عددی نشان داده است که ضخامت ۴ میلی‌متر، ضخامت بحرانی برای سختکاری است. چرا که ضخامت صفحه منفجره بالاتر از ۴ میلی‌متر سختی را به شدت افزایش می‌دهد. همچنین مدل عددی نشان داد که ضخامت‌های ۵ و ۷ میلی‌متر برای قطعه راه آهن یکپارچه، مناسبترین و به صرفه‌ترین ضخامت است. نتیجه آزمایش انفجار روی قطعه سوزن نشان داد با انفجار صفحه هگزوشیت با ضخامت ۷ میلی‌متر روی آن مقدار سختی از ۱۶۱ HB قبل از انفجار به ۳۳۳ HB در قسمت میانی سوزن و ۳۶۸ HB در قسمت دماغه که تحت بار ضربه‌ای بیشتری است، افزایش می‌یابد.

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: ۱۱ شهریور ۱۴۰۰  
 داوری اولیه: ۲۷ شهریور ۱۴۰۰  
 پذیرش: ۲۱ آبان ۱۴۰۰  
 کلیدواژه‌ها:  
 سختکاری انفجاری  
 سوزن ریل  
 تحلیل عددی

## Experimental and Numerical investigation of explosive work hardening process on railway frogs

Gholamhosein Liaghat<sup>1\*</sup>, Seyed Ali Tabatabaei Ghomi<sup>2</sup>, Morteza Aghaei<sup>3</sup>, Hamidreza Hafizi Atabak<sup>4</sup>, Keyvan Nosratzadegan<sup>4</sup>, Mohammad Taghi Rahiminezhad<sup>2</sup>, Sahar Saedghi<sup>2</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Research Group of Metallic Material Processing and Forming, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Tehran Organization, Tehran, Iran.

3- Department of Chemistry, Iran University of Science and Technology

4- Chemistry and Chemical Engineering Research Center

\* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper  
 Received: 2 September 2021  
 First Decision: 18 September 2021  
 Accepted: 12 November 2021

## Keywords:

Explosive work-hardening  
 Railway switches  
 FEA

## Abstract

In the railway transportation system, frogs play a crucial role. Frogs provide flexibility in the transportation system due to their intersecting different paths. During the transition of the rail, contact and impact forces are applied to the main body and nose of the frog, causing degradation and wear. Furthermore, impact forces cause extensive wheel damage and higher maintenance costs. As a result, the frog's wear resistance needs to be improved in order to prevent unusual plastic deformations and wear degradation under cyclic loadings. Explosive work-hardening is one of the most effective and cost-effective methods for increasing the hardness of Hadfield's steel to match the properties of railway materials. The hardness of the frog's running surface is between 320 and 390 HBW, according to relevant Standards. The experimental results were validated against FE analysis after calculating optimal explosive energy using a numerical approach, and then the DOI were adopted based on numerical results. According to the FE model, the critical thickness of explosive material is 4 mm, and increasing the thickness of explosive plate significantly increased the hardness. Furthermore, the FEM results revealed that the 5- and 7-mm thicknesses of explosive plate produced the best results in the rail hardening process. The hardness of railway frogs was increased from 161 HBW to 326 HBW and 347 HBW, respectively, by using 7 mm thick explosive plate in the hardening process.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Gh. Liaghat, S. A. Tabatabaei Ghomi, M. Aghaei, H. Hafizi Atabak, K. Nosratzadegan, M. Taghi Rahiminezhad, S. Saedghi, Experimental and Numerical investigation of explosive work hardening process on railway frogs, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 9, pp. 23- 36, 2021 (in Persian)

## ۱- مقدمه

استفاده می‌گردد. امروزه با افزایش نیاز به خدمات، در موارد خاص سخت شدن انفجاری تقریباً تنها راه‌حل است. بنابراین، علی‌رغم برخی ویژگی‌های منفی سختکاری انفجاری، مشکل افزایش عمر سوزن راه‌آهن آنقدر ضروری است که شرکت‌های راه‌آهن از این روش (سختکاری انفجاری) برای این منظور استفاده می‌کنند.

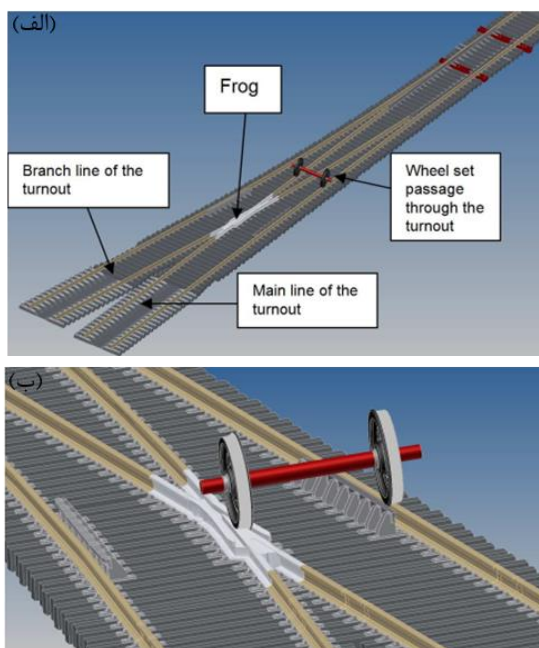


Fig. 1 a) The mainly part of railway crossings b) changing the path process [7].

شکل ۱ الف) قسمت‌های اصلی مربوط به تعویض مسیر از طریق سوزن. ب) محل‌های درگیر شده به هنگام تعویض مسیر [۷].

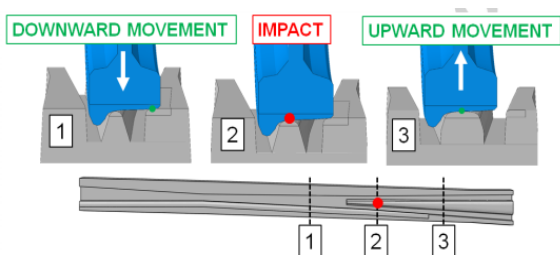


Fig. 2 Applied forces on the frogs during changing the way [1]

شکل ۲ فرایند اعمال ضربه به هنگام تغییر مسیر از طریق سوزن [۱]

سخت شدن انفجاری سوزن‌های راه‌آهن ساخته شده از فولاد، یک تکنولوژی رایج در دنیا است که به افزایش سختی سطحی و زیرسطحی سوزن کمک می‌کند. این افزایش سختی باعث بهبود مقاومت به سایش سطوح در سوزن‌های راه‌آهن و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنها می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق‌های انفجاری یا افزایش تعداد

سوزن‌های ریل راه‌آهن یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیستم حمل و نقل ریلی است، چراکه اجازه اتصال دو مسیر مختلف را می‌دهند و همین امر باعث انعطاف پذیری و آسانی کار بسیاری می‌شود (شکل ۱). بسته به نوع طراحی و نوع سوزن‌ها، در هنگام انتقال چرخ از یک ریل به ریل دیگر، در ابتدا ضربه رو به پایین توسط چرخ به سوزن و سپس تماس ضربه‌ای و در آخر جدایش چرخ از سوزن نیروهای زیادی ایجاد می‌کند [۱، ۲]. به ویژه در محل سوزن‌های ثابت که دارای شکافی مربوط به طراحی هستند، نیازی به توجه خاصی دارند (شکل ۲). این طراحی چرخ را مجبور به حرکت به سمت پایین و بالا می‌کند که منجر به تماس زیاد می‌شود و نیروی ضربه‌ای بسیار شدیدی به سوزن در درجه اول و به چرخ در درجه دوم وارد می‌کند؛ که در نتیجه هزینه تعمیر و نگهداری بسیاری را به همراه دارد.

فولاد هدفیلد نوعی ماده فلزی با محتوای بالای کربن و منگنز است و اثرات سخت‌شوندگی بسیار خوبی می‌تواند از خود نشان دهد. سطح قطعه کار پس از قرار گرفتن در معرض ضربه یا تغییر شکل سرد<sup>۱</sup>، به سرعت سخت می‌شود. در حالی که لایه زیرین سطح هنوز حالت و خواص مکانیکی اولیه و ویژگی نرم بودن<sup>۲</sup> خود را حفظ می‌کند. چنین ویژگی‌هایی، کاربرد اینگونه مواد را در صنعت دوچندان کرده است [۲-۵]. این فولاد به طور گسترده در ساخت سوزن‌های ریل راه‌آهن، مخازن، قطعات تراکتور، قسمت‌های مستعد سایش در سنگ‌شکن‌ها، بولدوزر و ماشین‌آلات معدنی به کار گرفته شده است.

مقاومت به سایش و استحکام فولاد هدفیلد در مراحل اولیه عمر کاری سوزن ریل پایین است. به دلیل اینکه کارسختی کاملاً اعمال نشده است، بنابراین سختکاری اولیه باید روی سطح، مخصوصاً روی دماغه سوزن ریل اعمال شود تا سبب افزایش مقاومت به سایش و مقاومت به تغییر شکل شود. تکنیک‌های سختکاری اولیه سطحی شامل شات بلاست، نورد، فورجکاری چکشی و انفجار است. لایه سختکاری شده از شات بلاست یا نورد و یا فورجکاری چکشی نازک است (در حد چند میکرون) و برای افزایش عمر کاری سوزن ریل کافی نیست؛ بنابراین بهترین روش برای سختکاری فولاد به کارگرفته شده در سوزن ریل، سختکاری انفجاری است که دارای عمق سختی بالاتر می‌باشد [۶].

از انرژی انفجار برای سخت شدن و تمیز کردن سطوح قطعات فلزی، شکل‌دهی و همچنین جوشکاری انفجاری به طور گسترده

<sup>1</sup> Cold deformation

<sup>2</sup> Ductility

شکل انفجاری در سوزن ریل ساخته شده از فولاد هدفیلد، تغییر شکل درجا می‌باشد. بعلاوه مکانیزم کارسختی ناشی از سختکاری انفجاری در عمق متفاوت از سطح می‌باشد، دوقلویی در مقیاس نانو ناشی از تغییر شکل و مکانیزم کارسختی ناشی از نابجایی در لایه سطحی اتفاق می‌افتد و مکانیزم کارسختی در لایه زیر سطح تنها ناشی از نابجایی‌ها می‌باشد [۶، ۹].

در مطالعه‌ای، گوسکوو و همکاران [۱۰] تأثیر شوک انفجاری روی فولاد منگنز در فواصل مختلف از سطح را مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند هرچه فاصله از سطح به سمت داخل فولاد پیش می‌رود، مقدار سختی به صورت خطی کاهش می‌یابد. آنها همچنین با استفاده از عکس برداری اشعه ایکس دریافتند مرزخانه‌های موجود در سطوح رویی نسبت به لایه‌های درونی جهت‌گیری متفاوتی دارند. همچنین دریافتند مقدار تنش تسلیم و نهایی سطح رویی فولاد بسیار بیشتر از سطوح زیرین بوده و مقدار دوبرابری نسبت به لایه‌های زیرین دارد. در مطالعه دیگر مکلیود [۱۱] سخت‌کاری انفجاری در نرخ کرنش‌های پایین را پیشنهاد داد. در ادامه چمپیون و همکاران [۱۲] با استفاده از حل تحلیلی معادله حالت هوگونویوت و سختکاری بوسیله اعمال شوک تنشی با دامنه‌های مختلف به سطح قطعه در نرخ کرنش‌های پایین توانستند مقدار سختی در سطح فولاد را تا عمق ۴۰ میلی‌متر افزایش دهند. همچنین آنها تأثیر زمان اعمال شوک تنشی را در کنار دامنه آن، یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر میزان افزایش سختی معرفی نمودند.

ژانگ و همکاران [۱۳] تأثیر انفجار روی تغییر شکل ریز ساختارها و سختی فولاد مربوط به سوزن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شوک ناشی از انفجار باعث ایجاد اعوجاج ماکروسکوپی از سطح مقطع فولاد ریل می‌شود. آنها نتیجه گرفتند هرچه مقدار نرخ کرنش حاصل از انفجار افزایش یابد مقدار کرنش ترشهولد کمتری برای تشکیل کریستال‌های دوقلو نسبت بارگذاری استاتیکی نیاز دارد. همچنین دریافتند در هنگام انفجار، لغزش مرزخانه‌ها و دوقلو شدن دانه به صورت همزمان رخ داده که این امر باعث افزایش مضاعف مقدار سختی در سطح سوزن می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر روی تغییر ریزساختار فولاد تحت بارگذاری انفجاری، کواکس و همکاران [۱۴] ارتباط بین میزان سختی و تغییرات ساختاری فولاد مربوط به سوزن راه‌آهن را بررسی کردند. آنها دریافتند میزان سختی با افزایش نرخ کرنش و زمان اعمال انفجار رابطه مستقیم داشته و باعث ساختار آستنیتی ماده تحت انفجار به ساختار مارتنزیتی تغییر می‌یابد.

دفعات انفجار سبب افزایش سختی سطح سوزن ریل می‌شوند [۶، ۷].

سختی سطح سوزنی که سختکاری نشده است، در حدود HB ۲۰۰ است. سوزن‌های سخت نشده به سرعت در مدت زمان بسیار کمی پس از استفاده دچار سایش شده و در حدود ۳ میلی‌متر خورده می‌شوند. سخت شدن انفجاری سطوح سوزن‌ها قبل از جایگذاری در مسیر ریل باعث افزایش سختی به HB ۴۰۰ می‌شود. سختکاری انفجاری، سختی زیر سطحی سوزن را تا عمق ۲۰ میلی‌متر افزایش می‌دهد [۷، ۸].

مکانیزم‌های مختلفی در کارسختی فولاد هدفیلد سهم دارند که بستگی به فاکتورهایی مثل ترکیب شیمیایی آلیاژ (انرژی نقص چیدمان، حساسیت به نرخ کرنش)، دما و نرخ کرنش دارد. این مکانیزم‌ها شامل دوقلویی مکانیکی، تشکیل عیوب انباشتگی و پیرسازی کرنش دینامیکی می‌باشد. این اثبات شده است که استحاله ناشی از تغییر شکل از آستنیت به مارتنزیت  $\alpha$  (bcc) در فولادهای هدفیلد متداول اتفاق نمی‌افتد. نقش چنین استحاله‌ای در کارسختی در فولادهای کم کربن و سطح منگنز کم دارای اهمیت بیشتری است. هنگام انفجار سطح سوزن ریل ضربه گذرا و عمود بر سطح اعمال می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. در سختکاری انفجاری سوزن ریل، انرژی ضربه انفجار به طور قابل توجهی از طریق تغییر شکل پلاستیک دانه‌های داخلی جذب می‌شود که دلیل آن این است که جذب کامل انرژی ضربه نیازمند امتداد یافتن تغییر شکل پلاستیک به داخل سوزن ریل است. بنابراین اگر چه ممکن است هیچ تغییر شکل مشخصی در ظاهر مشهود نباشد، اما دانه‌های داخلی متحمل تغییر شکل پلاستیک قابل توجهی می‌شوند.

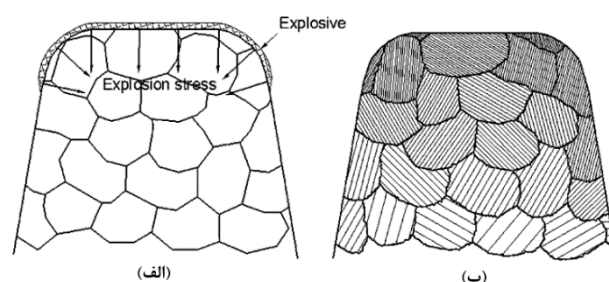


Fig. 3 Deformation pattern of railway switch a) before loading, b) after loading

شکل ۳ شماتیکی از تغییر شکل درجا از سوزن ریل از جنس فولاد منگنز بالا (الف) قبل و (ب) بعد از انفجار

فرآیند تغییر شکل با هماهنگی دانه‌های مشخصی که موقعیت اصلی اشان را حفظ کرده اند پیش می‌رود و بنابراین تغییر شکل درجا نامیده می‌شود. به طور کلی مکانیزم تغییر

ماراندا و همکاران [۲۳] تغییر ریز ساختار و دانه‌بندی و همچنین نحوه تغییرات و توزیع سختی در سطح فولاد ریل آهن St72P را تحت انفجار با تغییر ضخامت صفحه انفجاری و تعداد دفعات بارگذاری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد دفعات بارگذاری و ضخامت صفحه انفجاری اندازه دانه‌ها کاهش یافته و مقدار سختی افزایش می‌یابد.

در پژوهش حاضر، به بررسی سختی ریل‌های راه آهن در محل سوزن و میزان تغییر مقاومت آن تحت سختکاری انفجاری پرداخته شده است. هدف از این مطالعه، اثرات انفجار در نرخ کرنش‌های متفاوت بر روی افزایش میزان سختی فولاد می‌باشد. در ابتدا با استفاده از نرم افزار المان محدود اباکوس پیش بینی‌های مورد انتظار از رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است و در ادامه آزمایشات تجربی در نمونه‌های اصلی سوزن ریل راه‌آهن با استفاده از نتایج عددی طراحی می‌شوند. سپس میزان افزایش سختی و تأثیرات آن مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت. طبق مطالعات انجام شده، مقدار سختی سوزن و ریل راه‌آهن بویژه در محل اتصال سوزن و ریل راه‌آهن مطابق استانداردهای دسته‌بندی شده در جدول ۱ باید باشد [۷].

جدول ۱ سختی حاصل از سخت کاری انفجاری در استانداردهای مختلف [۷].

Table 1 Standards of explosive work-hardening [7].

کشور تأییدکننده	استاندارد	مقدار سختی بعد از سختکاری (HB)
اتحادیه اروپا	EN15689	۳۲۱
سوئیس	SBB-10-028-C3	۳۲۱
امریکای شمالی	AREMA-100-08	۳۵۲
استرالیا	ETA-03-03	۳۵۰-۴۱۵
روسیه	Gost-7370-98	۳۳۱-۳۹۸

## ۲- تحلیل به روش المان محدود<sup>۱</sup>

روش‌های عددی ابزاری کلی برای تجزیه و تحلیل هندسه‌های دلخواه و شرایط بارگذاری مختلف فراهم می‌کنند. در میان روش‌های عددی، تحلیل المان محدود<sup>۲</sup> به طور گسترده‌ای با موفقیت استفاده شده است. با این حال، این نوع تجزیه و تحلیل نیاز به بهره‌گیری گسترده از سیستم‌های تحلیل رایانه‌ای دارد. FEM انتخاب خوبی برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای انفجار و ضربه می‌باشد. زیرا نیاز به آزمایش‌های زمانبر برای بهینه سازی پارامترهای مربوطه را از بین برده و سرعت بررسی و تحقیق و

چمپیون و همکاران [۱۲] به این نتیجه رسیدند که افزایش سختی در فولاد هدفیلد از طریق سختکاری انفجاری می‌تواند به منظم کردن چیدمان دانه بندی‌ها و برهم کنش بین نابیایی‌ها و دوقلوبی شدن نسبت داده شود. مطالعات نشان می‌دهند که مکانیزم‌های سخت کاری انفجاری در فولاد هدفیلد بسیار پیچیده بوده و به شدت وابسته به شرایط تغییر شکل است. در حقیقت، سختی فولاد هدفیلد سخت کاری شده به تدریج از سطح به مرکز ماده به دلیل کاهش کرنش و نرخ کرنش موضعی در این محل‌ها، کاهش می‌یابد [۱۳]. همچنین در مطالعه مربوط به گرونوستاجسکی [۱۵]، تفاوت قابل توجه بین سختکاری ایستایی و انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه مشخص شد نمونه‌های تحت بار انفجاری نسبت به نمونه‌های تحت بار ایستایی دارای تنش تسلیم و نهایی به ترتیب ۲ و ۳ برابری هستند. همچنین دیگر محققان [۱۶-۱۸] دریافتند هرچه مقدار فشار ایجاد شده حین انفجار بیشتر باشد، بهبود بیشتری در افزایش سختی سطح مشاهده می‌شود. دلیل این امر در بالا رفتن چگالی نابیایی‌ها است. تغییر شکل‌ها به هنگام انفجار از طریق لغزش و دوقلوبی شدن‌ها پدید آمده و همچنین اثرات نرخ کرنش بر تغییر شکل سطح تأثیر بسزایی می‌گذارد. در نتیجه هر چه مقدار نرخ کرنش در اثر افزایش میزان قدرت انفجار افزایش یابد، تغییر شکل‌ها به گونه‌ای ایجاد می‌شوند که مقدار تنش تسلیم و تنش نهایی و نهایتاً میزان سختی سطح افزایش می‌یابد.

در ادامه، کریشتال و همکاران [۱۹] دریافتند که سختکاری سطح فولاد هدفیلد به وسیله بارگذاری انفجاری به طور قابل توجهی به ساختار اصلی و پایه‌ای ماده قبل از سختکاری بستگی دارد؛ انفجار اغلب موجب افزایش تراکم ریز دوقلوها و نابیایی‌ها می‌شود. آوراوا و همکاران [۲۰] دریافتند که به هنگام انفجار، حتی هنگامی که برایند تغییر شکل‌های دانه‌ها صفر است، موج ضربه‌ای باعث تغییراتی در ساختار مواد، از جمله افزایش تراکم دوقلوبی‌ها، افزایش تراکم تخلخل‌ها و تغییر کلی ساختار نابیایی‌ها می‌شود. به این دلیل خواص مکانیکی فولاد تغییر می‌کند. مور [۲۱] نشان داد که تراکم نامساوی تخلخل‌ها بوجود آمده پس از انفجار وابسته به نرخ کرنش انفجار است. اتو و همکاران [۲۲] اثرات مواد منفجره در تغییر شکل و تغییر شکل استاتیک بر خواص مکانیکی فولادهای هدفیلد را مقایسه کردند. مشخص شد که نمونه‌های تحت انفجار دارای مقاومت بیشتری در سایش و ضربه ناگهانی نسبت به نمونه‌های تحت تغییر شکل استاتیک دارند.

<sup>۱</sup> FEM

<sup>۲</sup> FEA

مدل‌سازی شده‌است. لازم به ذکر است در این بخش یک نقطه مرجع به منظور مشخص کردن محل انفجار تعریف می‌شود. به منظور در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنشی و تغییرات تنش تسلیم تحت بار انفجاری، از مدل تخریب جانسون-کوک استفاده شده است.<sup>۱</sup>

برای تحلیل مدل از حلگر غیرصریح دینامیکی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. با فعال‌سازی حل غیرخطی در ابعاد کوچک، تغییر شکل‌های کوچک نیز در نظر گرفته می‌شود.

سطح زیرین نمونه برای ایجاد شرایط واقعی در شبیه‌سازی کاملاً مقید شده‌است. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است با تعریف یک نقطه مرجع در بالای قطعه، مرکز جرم صفحه انفجاری ورقه‌ای مشخص شده و نیروی ناشی از انفجار به صورت گسترده به تمام سطح نمونه به صورت یکنواخت اعمال خواهد شد.

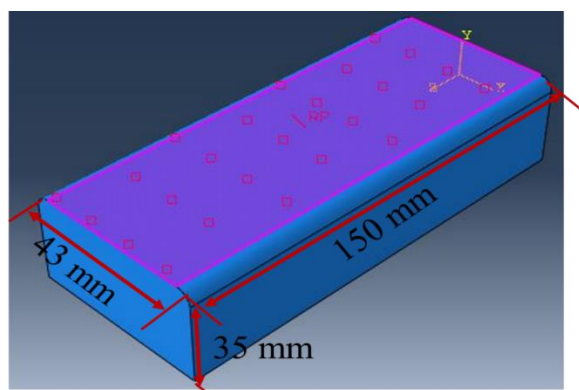


Fig. 4 FE model of individual part of the rail

شکل ۴ نمونه مدل‌سازی شده تحت بار انفجاری

در این مدل از مش ۸ نودی با انتگرال‌گیری کاهش یافته از نوع Solid مربعی استفاده شده است. پس از مطالعات همگرایی مش، ابعاد  $1/2 \times 1/2$  میلی‌متر برای هر المان در نظر گرفته شده‌است. شکل ۵ نمونه مش‌ریزی شده از دو نما را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی اثر انفجار در این مطالعه و یافتن مقدار ماده منفجره مناسب، ضخامت‌های مختلفی از ماده منفجره ورقه‌ای، از ۱ تا ۷ میلی‌متر، بر سطح نمونه اعمال می‌شود تا مقدار مناسب سختی بدست آید.

#### ۴- نتایج تحلیل عددی

بررسی و تحلیل نتایج عددی نشان داد، هنگامی که ضخامت ماده منفجره ورقه‌ای از ۴ میلی‌متر بیشتر می‌شود، سختی سطح

همچنین طراحی آزمایش دقیق را میسر می‌سازد. از شبیه‌سازی‌های FEM به طور فزاینده‌ای برای شبیه‌سازی و بررسی فرایندهای انفجار استفاده می‌شود چراکه بسیاری از آزمایشات وقت گیر را می‌توان با شبیه‌سازی رایانه‌ای جایگزین کرد و از صرف هزینه و زمان زیاد جلوگیری نمود. بنابراین، با استفاده از شبیه‌سازی FEM می‌توان نتایج بسیار دقیقی بدست آورد.

در سختکاری انفجاری فلزات نیاز اساسی به دانستن این موضوع دارد که شوک ناشی از انفجار با نرخ کرنش‌های متفاوت چه تأثیری در میزات سخت شدن و نحوه تغییر در جهت‌گیری دانه‌های موجود در ماده سطح فلز و تغییرات مرزبندی دانه‌های سطح دارد. به عبارت دیگر تغییر مقدار ماده منفجره اعمالی چه تأثیری بر میزان عیوب کریستالی ایجاد شده در سطح و میزان سخت شدن آن دارد. این کار باعث افزایش کارایی فرآیندهای تولید و کاهش سطح هدر رفته مواد، زمان و هزینه در مراحل آزمایش‌ها و تولید می‌شود. این مهم می‌تواند با ترکیب روش اجزا محدود و طراحی آزمایش با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر افزایش کارایی و بهره‌وری و همچنین کاهش هزینه‌های تحقیق و تولید مرتبط با سختکاری انفجاری، حاصل شود.

همواره تحلیل عددی آزمایشات پیش از اجرای آزمایش به عنوان یک ابزار برای پیش‌بینی نتایج و تصمیم به تغییرات در پارامترهای مؤثر در آزمایش یک امر ضروری است؛ چرا که از اجرای آزمایش‌های بی‌بهره و دور شدن از هدف و هدررفت هزینه‌ها جلوگیری می‌نماید. به منظور بررسی و تحلیل اثر پارامترهای مختلف در سختکاری انفجاری سوزن ریل راه‌آهن، نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم‌افزار به دلیل داشتن حل‌گر غیر صریح قدرتمند و برخورداری از ابزارهای مناسب برای مش‌بندی سازه مورد نظر، بسیار مورد توجه محققین می‌باشد. در مرحله اول این پژوهش، سطح رویی ریل راه‌آهن طراحی و تحلیل می‌شود. هدف از این کار بررسی تأثیر اعمال مقادیر مختلف از ماده منفجره بر روی سطح فولاد مربوط به ریل راه‌آهن است. پس از یافتن جرم مناسب و بهینه از ماده منفجره، آزمایش‌های سختکاری انفجاری روی تکه‌ای از قطعه ریل راه‌آهن انجام و نتایج سختی سنجی با نتایج تحلیل عددی مقایسه و صحت‌سنجی می‌شود. سپس آزمایش‌های سختکاری انفجاری روی سوزن ریل راه‌آهن اجرا و نتایج بررسی و تحلیل شده است.

#### ۳- شبیه‌سازی عددی

مطابق شکل ۴، بخش رویی ریل با توجه به اندازه‌های مربوطه

<sup>1</sup> Johnson-cook  
<sup>2</sup> Dynamic,Explicit

متعددی همچون مدل تیبور توسط محققان [۲۴-۲۷] ارائه شده است. مدل تیبور از دقت خوبی، به ویژه در فولاد، برخوردار بوده که رابطه خطی بین تنش نهایی قطعه و سختی ویکرز را نشان می‌دهد. ضریب رابطه (۱) می‌تواند از ۲/۶ تا ۳/۵ بسته به نوع ماده متفاوت باشد.

$$H_v \cong 3\sigma \quad (1)$$

## ۵- فرایند آزمایشگاهی

### ۵-۱- اجرای آزمایش

فولاد هدفیلد ریخته‌گری شده برای کاربرد در سوزن ریل و مورد مطالعه در این تحقیق مطابق با استاندارد O-UIC 866 می‌باشد ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد هدفیلد مورد استفاده در این تحقیق، با استفاده از اطلاعات بدست‌آمده از تولیدکننده، به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

عملیات سختکاری در سه فاز صورت گرفته است. در فاز اول قطعات ۱۵ سانتی‌متری از سوزن ریل راه‌آهن که شامل قطعه سه وجهی (A)، قطعه پهن (B) و قطعه دو وجهی می‌باشد و عملیات سخت کاری در راستای مطالعات عددی انجام می‌شود. همچنین در فاز دوم قطعات ۵۰ سانتی‌متری از سوزن ریل در راستای تثبیت دانش بدست آمده از فاز اول مورد سختکاری انفجاری قرار گرفتند و در فاز سوم سوزن ریل اصلی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. مراحل و روند آزمایشات سختکاری انفجاری در این ۳ فاز در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۳ ترکیب شیمیایی فولاد هدفیلد مورد مطالعه

عناصر	C	Mn	Si	S	P
	۰/۹۵-۱/۳	۱۱/۵-۱۴	<۰/۶۵	<۰/۰۳	<۰/۰۴
	درصد وزنی (%)				

جدول ۴ خواص مکانیکی فولاد هدفیلد مورد مطالعه

نمونه	خواص مکانیکی			
	0.2% Yield Str.(MPa)	Tensile Str.(MPa)	Elongation (%)	Brinell Hardness (HB)
Hadfield steel	۳۴۵-۳۹۳	۹۰۳-۱۰۰۰	۳۰-۶۵	۱۸۵-۲۰۰

### ۵-۲- ماده منفجره و عملیات انفجار

یکی از مهمترین بخش‌های یک سخت کاری انفجاری مطلوب تأمین و تعیین زنجیره آتش مناسب بر طبق ضخامت صفحات مختلف انفجاری و نقطه شروع آتش در ابتدای زنجیره و ادامه آن، انفجار کامل است. زنجیره آتش به گونه‌ای طراحی شده است

قطعه افزایش می‌یابد. در نهایت هنگامی که ضخامت صفحه انفجاری به ۷ میلی‌متر افزایش یافت، سختی قطعه در نواحی مختلف آن (شکل ۶) به مقادیر در محدوده ۳۰۰Hv - ۴۰۰ که تقریباً دو برابر مقدار اولیه آن است، افزایش می‌یابد. جدول ۲ مقادیر بدست آمده از تحلیل عددی برای صفحات انفجاری با ضخامت ۷ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

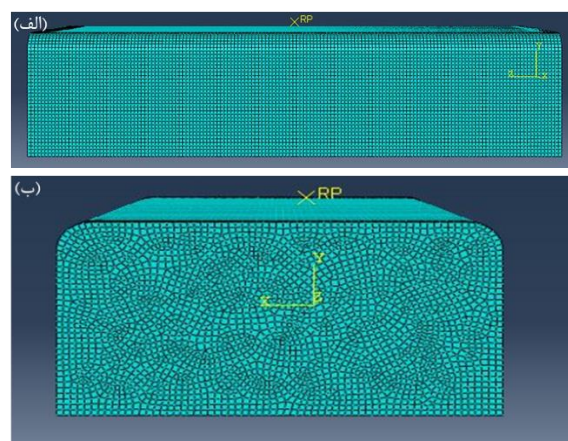


Fig. 5 Meshed specimen a) side view b) front view

شکل ۵ نمونه مش‌بندی شده (الف) نمای کناری و (ب) نمای روبروی

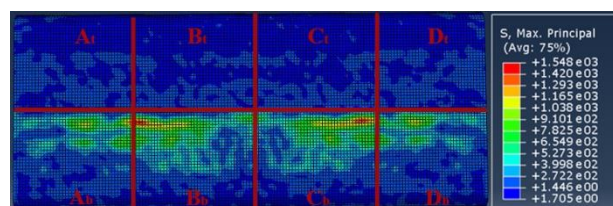


Fig. 6 Exploded specimen

شکل ۶ نمونه تحت انفجار و تقسیم نواحی برای محاسبه سختی مربوطه

جدول ۲ تنش باقی‌مانده در قطعه و سختی محاسبه‌شده حاصل از تحلیل عددی

ناحیه	میانگین تنش باقی‌مانده در نمونه (MPa)	سختی (H <sub>v</sub> )
A <sub>t</sub>	۹۵/۰۴	۲۸۵/۱۲
B <sub>t</sub>	۱۰۴/۴	۳۱۳/۲
C <sub>t</sub>	۱۰۳/۵	۳۱۰/۵
D <sub>t</sub>	۱۰۳/۳۲	۳۰۹/۹۶
A <sub>b</sub>	۱۲۹/۶	۳۸۸/۸
B <sub>b</sub>	۱۴۰/۴	۴۲۱/۲
C <sub>b</sub>	۱۳۴/۱	۴۰۲/۳
D <sub>b</sub>	۱۳۰/۹۵	۳۹۲/۸۵

در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، سختی به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. بنابراین، با استفاده از روابط تقریبی بین تنش در قطعه بعد انفجار و سختی استفاده می‌شود. مدل‌های

حداقل در ۳ نقطه اندازه‌گیری شد.

جهت انجام تست سختی سنجی نمونه‌ها در فاز ۲ و ۳ و با توجه به ابعاد بزرگ نمونه‌ها از دستگاه سختی سنجی پرتابل استفاده شد. آزمون سختی سنجی بر اساس استاندارد ASTM A956-12 انجام شده است. سختی نمونه‌ها بر حسب سختی برینل و حداقل در ۱۰ نقطه اندازه‌گیری شد. فاصله نقاط نمونه به شکلی در نظر گرفته شد، که تغییرات سختی کل سطح نمونه را پوشش بدهد. جهت دقیق بودن مکان‌های سختی سنجی قطعه سوزن ریل، موقعیت نقاط سختی سنجی سوزن ریل مطابق شکل ۷ نشانه گذاری گردید. همچنین قبل از سختی سنجی سطح نمونه‌ها ماشینکاری و پولیش گردید.



Fig. 7 Position of specified points to obtain hardness values.

شکل ۷ موقعیت نقاط نشانه گذاری شده جهت سختی سنجی

## ۶- نتایج و بحث

با توجه به حل عددی و طراحی آزمایش انجام شده، در این بخش ابتدا به صحت سنجی مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در فاز اول مربوط به سختکاری قطعه سه‌وجهی پرداخته می‌شود. سپس نتایج مربوط به فاز دوم و سوم مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

### ۶-۱- سخت‌کاری انفجاری قطعات سوزن ریل در فاز اول

در این بخش، ریل راه‌آهن به سه قسمت (شکل ۸) تقسیم شده و سختی هر قسمت قبل انفجار اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است که انجام آزمایش انفجار در دو فضای باز و بسته صورت می‌پذیرد تا دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر تسهیل شود. جدول ۶ مشخصات مربوط به طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. در شکل ۹ شرایط انفجار در فضای بسته و همچنین نمونه‌های آزمایش شده مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج آزمون سختی سنجی مشخص شد، نتیجه حاصل از قطعه اصلی در بخش رویه آن (قطعه سه‌وجهی) نشان داد که سختی ویکروز از عدد ۱۸۰ به ۲۷۴ رسید است. مقدار ضخامت صفحات انفجاری

که فرایند انفجار در فضای باز و بسته صورت می‌گیرد. زنجیره آتش شامل شامل ۳ بخش می‌باشد: ۱- فیتیله، ۲- کابل همراه، ۳- صفحات انفجاری ورقه‌ای، ۴- چاشنی و ۵- اکسپلودر<sup>۱</sup>.

جدول ۵ مراحل آزمایشات سختکاری انفجاری قطعات سوزن ریل

Table 5 Identification of three different steps of the experiment

مراحل	ابعاد	تعداد قطعات	عملیات سختکاری انفجاری
فاز اول	سانتی‌متری از سوزن ریل	۳ قطعات ۱۵ سانتی‌متری	سختکاری انفجاری در دو فضای باز و بسته و با شیت‌های انفجاری به ضخامت ۴ میلی‌متر
فاز دوم	سانتی‌متری از سوزن ریل	۲ قطعات ۵۰ سانتی‌متری	سختکاری انفجاری در فضای باز و با شیت‌های انفجاری با ضخامت ۵ و ۸ میلی‌متر
فاز سوم	سوزن ریل اصلی	۱	سختکاری انفجاری در فضای باز و با شیت‌های انفجاری به ضخامت ۷ میلی‌متر

ماده منفجره برای استفاده در این پروژه از ماده منفجره پلاستیکی هگزو پلاست GP-87 انتخاب گردید که ترکیبی از مواد منفجره کریستالی قوی (معمولاً هگزاگون) با چسب (معمولاً لاستیک‌های متفاوت) می‌باشد. این ماده منفجره حاوی کلوکسیلین به عنوان پایه و با نیترواسترهای مایع از الکل‌های پلی‌هیدریک پلاستیکی شده است. این ماده منفجره به صورت شارژهای ورقه‌ای (شیت‌های انفجاری) برای سختکاری و جوشکاری انفجاری فلزات و دیگر محصولات به کار گرفته می‌شود. چگالی صفحات انفجاری ورقه‌ای GP-87، ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. ابعاد صفحات انفجاری متناسب با ابعاد قطعه کار و محاسبات عددی می‌باشد.

### ۳-۵- سختی سنجی

برای انجام تست سختی سنجی نمونه‌ها در فاز اول از تست سختی سنجی ویکرز استفاده شد. مقادیر سختی نمونه‌های سختکاری شده توسط دستگاه سختی سنج به روش ویکرز، مدل Diatestor 751 ساخت شرکت INSTRON Wolpert، اندازه‌گیری می‌شود. آزمون سختی بر اساس استاندارد مرجع ISO 6507-1/2005 با فرورونده هرم الماسی و نیروی اعمالی ۱۰ kg.f انجام شده است. همچنین زمان اعمال نیرو نیز بین ۱۰ تا ۱۵ ثانیه لحاظ می‌شود. سختی نمونه‌ها در مسیری عرضی و

<sup>1</sup> Exploder

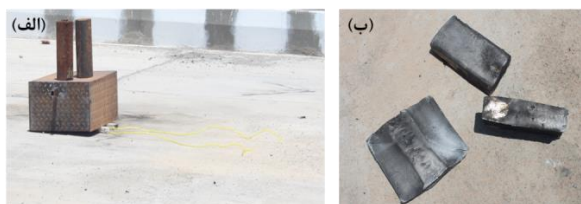


Fig. 9 a) Indoor explosion test, b) Exploded specimens  
شکل ۹ الف) تست انفجار در شرایط فضای بسته. ب) نمونه‌های تحت انفجار



Fig. 10 Explosion chain for outdoor condition  
شکل ۱۰ زنجیره آتش طراحی شده در فضای باز

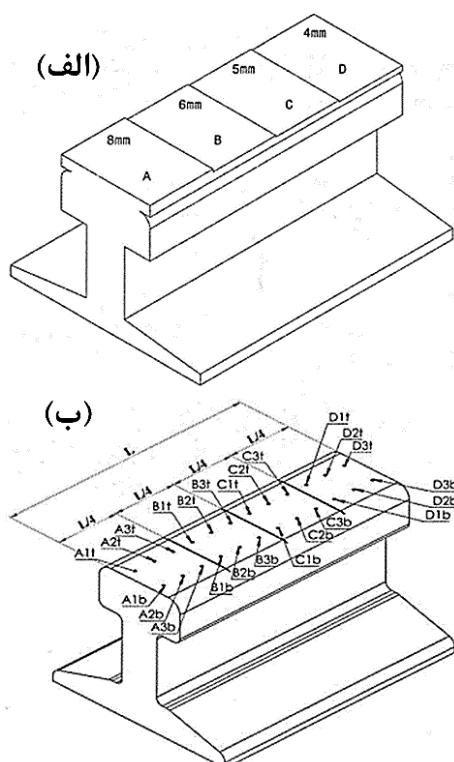


Fig. 11 Rail part schematic and divided sections  
شکل ۱۱ شماتیک قطعه ریل راه‌آهن و تقسیم‌بندی سطح بالایی به چهار ناحیه

برای هر ناحیه ضخامت صفحات انفجاری متفاوت از هم در نظر گرفته شده‌است. در جدول ۷ مشخصه‌های صفحات انفجاری ورقه‌ای دسته‌بندی شده‌است.

آزمایش انفجار روی سطح قطعه ریل، در فضا باز انجام شده و نتایج تست سختی‌سنجی در جدول ۸ برای ضلع مجاور و جدول

برای قطعات در این فاز از آزمایش ۴ میلی‌متر انتخاب گردیده است مطابق نتایج عددی، این مقدار ضخامت یک ضخامت بحرانی برای صفحات انفجاری می‌باشد و در ضخامت‌های بالاتر طبق شبیه سازی عددی انجام گرفته، سختی‌های اندازه‌گیری شده افزایش چشم‌گیری داشته است. همچنین نتایج برای فضای باز و بسته تقریباً یکسان بوده‌است. اما برای ادامه کار به دلیل بهره‌وری بیشتر آزمایش در فضای باز، تمامی آزمایشات در فضای باز صورت پذیرفته است.

### ۶-۲- سخت‌کاری انفجاری قطعات سوزن ریل در فاز دوم

در ادامه، قطعه یکپارچه از ریل راه‌آهن تحت آزمایش در فضای باز (شکل ۱۰) قرار گرفت. شماتیک قطعه مورد نظر و تقسیم‌بندی نواحی به منظور بررسی و مقایسه دقیق نتایج حاصل از سختی‌سنجی در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌است.

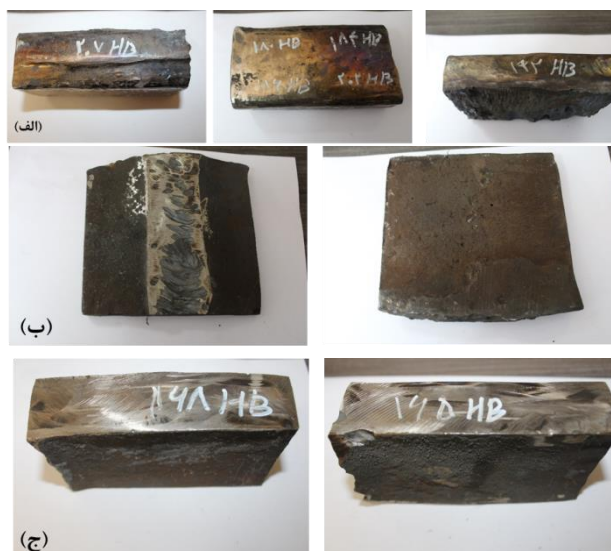


Fig. 8 individual parts of the rail a) upper part, b) the lower part and c) the middle part

شکل ۸ الف) قطعه سه وجهی مربوط به قسمت رویه ریل (A). ب) قسمت پهن زیرین ریل (B). ج) قطعه دووجهی مربوط به قسمت میانی ریل (C)

### جدول ۶ مشخصه‌های طراحی آزمایش بخش اول مطالعه

Table 6 DOE characteristics related to first step of experiment procedure

ردیف	نام قطعه	وجه	ضخامت ماده منفجره	فضای بالای تست
۱	B	۱۵*۱۴/۳	۴	باز
۲	B	۱۵*۱۴/۳	۴	بسته
۳	C	۱۴/۶*۳/۷	۴	باز
۴	C	۱۴/۶*۳/۷	۴	بسته
۵	A	۱۵/۳*۸/۶	۴	باز
۶	A	۱۵/۳*۸/۶	۴	بسته
۷	A	۱۵/۳*۸/۶	۴	باز



جدول ۸ نتایج سختی‌سنجی در ضلع مجاور قطعه

Table 8 work hardening results corresponding to side part of the specimen

Position	تست در ضلع مجاور	
	Hardness before test	Hardness after test
A1t	۱۶۶	۲۵۲
A2t	۱۴۹	۲۴۲
A3t	۱۶۳	۲۴۹
B1t	۱۷۴	۳۲۱
B2t	۱۶۳	۳۰۹
B3t	۱۶۲	۳۴۴
C1t	۱۶۱	۳۶۳
C2t	۱۷۲	۳۵۲
C3t	۱۷۳	۳۳۰
D1t	۱۷۱	۳۲۰
D2t	۱۵۶	۳۱۱
D3t	۱۴۵	۳۴۱



Fig. 13 Measuring the hardness of the specimens

شکل ۱۳ نحوه اندازه‌گیری تست سختی‌سنجی در محیط

جدول ۹ نتایج سختی‌سنجی برای ضلع نزدیک به انفجار

Table 9 Work hardening results corresponding to explosion adjacent part

تست در ضلع مجاور زاویه نزدیک به انفجار

Position	Hardness before test	Hardness after test
A1b	۱۸۱	۲۷۲
A2b	۱۷۶	۲۶۸
A3b	۱۷۳	۲۴۸
B1b	۱۷۷	۳۰۹
B2b	۱۷۷	۳۰۶
B3b	۱۷۹	۳۱۶
C1b	۱۶۴	۳۳۹
C2b	۱۶۸	۳۳۳
C3b	۱۶۹	۳۲۸
D1b	۱۶۹	۳۱۷
D2b	۱۶۰	۳۱۶
D3b	۱۶۷	۲۷۶

۹ برای ضلع نزدیک به انفجار استخراج شده‌است. این نتایج در ۲۴ نقطه اندازه‌گیری شده‌اند. بعلاوه، تصاویر قطعه بعد از عملیات انفجار شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. نواحی مختلف حاصل از انفجار به تفکیک قابل مشاهده هستند. در شکل ۱۳ نحوه اندازه‌گیری سختی نشان داده شده‌است.

جدول ۷ مشخصه‌های هگزوشیت مورد استفاده در انفجار

Table 7 Hex sheets characteristics utilizing in explosion process

ردیف	ناحیه بخش الفا	ضخامت صفحات انفجاری (mm)	ابعاد صفحات انفجاری (cm)
۱	A	۸	۱۶*۱۳
۲	B	۶	۱۶*۱۳
۳	C	۵	۱۶*۱۳
۴	D	۴	۱۶*۱۳



Fig. 12 Exploded specimen

شکل ۱۲ قطعه پس از انفجار

با توجه به نتایج مشخص شد که ضخامت بهینه برای صفحات هگزوشیت انفجاری بین ۵ تا ۷ میلی‌متر می‌باشد و بر این اساس، نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی تطابق خوبی باهم دارند. لازم به ذکر است با توجه به آنکه نتایج تحلیل عددی ماده منفجره با ضخامت ۴ میلی‌متر را به عنوان حالت بحرانی در نظر گرفته است و مواد منفجره با ضخامت‌های بالاتر از ۴ میلی‌متر سبب افزایش سختی گشته‌اند، مواد منفجره با ضخامت کمتر از ۴ میلی‌متر مورد بررسی سختکاری انفجاری قرار نگرفت.

۶-۳- سخت‌کاری انفجاری بر روی قطعه سوزن ریل راه‌آهن در مرحله نهایی از پژوهش حاضر، قطعه سوزن ریل اصلی تحت سختکاری انفجاری قرار گرفته‌است. به منظور محاسبه دقیق مقدار ماده منفجره، سطح تحت انفجار مربوط به سوزن باید به‌طور دقیق محاسبه شود. به همین منظور از نرم‌افزار کتیا برای محاسبه سطح مقطع سوزن استفاده شد (شکل ۱۵).  
 سطح مقطع مجموع سطوح قرمز و آبی برابر ۷۱۱۲۰۰ میلی‌متر مربع محاسبه شد.

جدول ۱۰ نتایج سختی سنجی تکرار قطعه ریل در فاز دوم

Table 10 work hardening results corresponding to replica of the railway specimen

Position	Hardness before test	Hardness after test	Sheet thickness (mm)
A1	۱۶۶	۳۰۲	۴
A2	۱۴۹	۳۱۵	۴
A3	۱۶۳	۳۰۴	۴
A4	۱۷۴	۳۲۹	۴
A5	۱۶۳	۳۰۴	۴
A6	۱۶۲	۳۲۱	۴
A7	۱۶۱	۳۲۱	۴
B1	۱۷۲	۳۴۵	۷
B2	۱۷۳	۳۳۰	۷
B3	۱۷۱	۳۳۵	۷
B4	۱۵۶	۳۵۴	۷
B5	۱۴۵	۳۴۸	۷
B6	۱۴۷	۳۴۰	۷
B7	۱۴۸	۳۲۸	۷

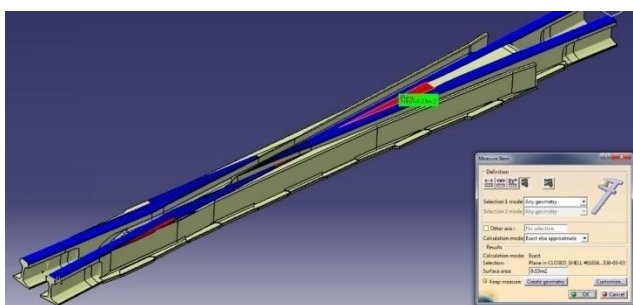


Fig. 15 Measuring the contact surface of the frog

شکل ۱۵ محاسبه سطح مقطع سوزن مورد نظر در نرم‌افزار کتیا

لازم به ذکر است که سطح مقطع اندازه‌گیری شده، همان سطحی می‌باشد که سوزن در حین استفاده در حالت واقعی تحت تماس با چرخ‌های بوده و دچار ساییش و فرسایش می‌شود.  
 شکل ۱۶ قطعه سوزن پوشیده شده با صفحات هگزوشیت را نشان می‌دهد. عملیات انفجار در فضای باز انجام گردید و سوزن

با توجه به نتایج جدول‌های ۵ و ۶ مشخص است که شیت‌های هگزوشیت انفجاری با ضخامت ۷ میلی‌متر نسبت به ضخامت ۸ میلی‌متر تأثیر بیشتری روی سختی قطعه داشته و مقدار آن را تا ۲ برابر افزایش می‌دهد. همچنین در مقایسه انجام شده بین هگزوشیت با ضخامت ۵ میلی‌متر با هگزوشیت با ضخامت ۶ میلی‌متر مشخص است تأثیر ضخامت صفحه هگزوشیت ۵ میلی‌متری گاه‌ب‌بیشتر از صفحه هگزوشیت با ضخامت ۶ میلی‌متر است. بر این اساس، ادامه روند آزمایشات بر روی یک قطعه ریل ۵۰ سانتی متری دیگر با در نظر گرفتن صفحات هگزوشیت انفجاری با ضخامت ۴ و ۷ میلی‌متر صورت گرفت که شماتیک آن و تقسیم بندی نواحی مورد نظر در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از سختی سنجی تکرار قطعه تکه ریل ۵۰ سانتی در جدول ۱۰ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد در همه نقاط سختی بالای ۳۰۰ HB می‌باشد.

به طور کلی نتایج حاصل از بخش اول آزمایشات فاز دوم و تکرار آن نشان داد در مواردی که صفحات انفجاری با ضخامت ۴ یا ۷ میلی‌متر استفاده گردیده، عدد سختی بالای ۳۰۰ HB است. با توجه به نتایج سختی در بسیاری از نقاط بیشتر از ۳۲۱ HB می‌باشد در نتیجه طبق جدول ۱ نیازمندی‌های استاندارد EN15689 را تأمین می‌کند و می‌توان گفت انطباق خوبی با این استاندارد دارا می‌باشد. مطابق جدول ۱۰ در مواردی که از صفحات انفجاری با ضخامت ۷ میلی‌متر استفاده گردیده است، دارای سختی بالاتری نسبت به صفحات انفجاری با ضخامت ۴ میلی‌متر می‌باشند به همین دلیل آزمایشات سختکاری انفجاری بر روی سوزن ریل اصلی با صفحات انفجاری با ضخامت ۷ میلی‌متر انجام گردید.

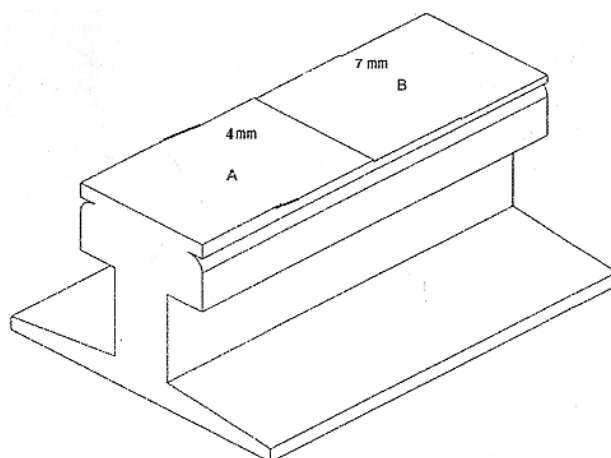


Fig. 14 Schematic of the rail specimen and division of its areas for explosion

شکل ۱۴ شماتیک قطعه ریل راه‌آهن و تقسیم بندی نواحی آن جهت انفجار

ریل تحت یکبار انفجار و دوبار انفجار مورد سختکاری انفجاری قرار گرفت.

نقشه نقاط سختی سنجی شده سوزن ریل بعد از یکبار انفجار در شکل ۱۷ نشان داده شده است. سختی سنجی در هر نقطه مشخص شده ۵ بار انجام گرفت و میانگین سختی بدست آمد. نتایج سختی سنجی بعد از سختکاری انفجاری با یک بار انفجار در جدول ۱۱ آورده شده است. طبق شکل ۱۷ و جدول ۱۱ قسمت نیشدلی و میانی ریل (R4، R5، R6 و R7) دارای سختی میانگین حدود ۲۴۶HB می‌باشند و سختی در قسمت بال‌ها (wings) که شامل بخش‌های TR، DR، TL و DL می‌باشد دارای سختی در بازه ۲۵۰-۳۲۹ می‌باشد. بنابراین با توجه نتایج سختی در بخش‌های میانی ریل کمتر از بال‌ها می‌باشد. تفاوت در سختی به دلیل تفاوت در مقدار سختی اولیه می‌باشد؛ به این معنی اگر مقدار سختی قبل از انفجار و بعد از ماشینکاری کم باشد، سختی نقاط حاصل از انفجار نیز نسبت به نقاط با سختی اولیه بالاتر، پایین تر خواهد بود. که در منابع دیگر نیز این موضوع تصدیق شده است.

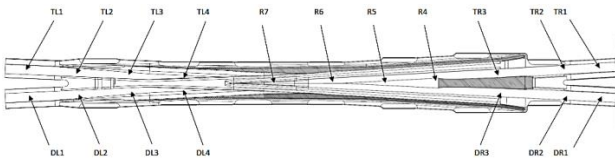
تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که سختی سطح و عمق لایه سخت شده با تکرار انفجار افزایش می‌یابد. در واقع تکرار انفجار سبب افزایش تغییر شکل و سختی می‌شود. به این صورت که تعداد ضربات بالا در فولاد هدفیلد سبب می‌شود که فولاد دچار تغییر شکل پلاستیک شدید شده و سبب ایجاد چگالی بالایی از نابیایی‌ها و عیوب انباشتگی گردد و در نتیجه استحکام و سختی به دلیل ممانعت از حرکت نابیایی‌ها که ناشی از چگالی بالای نابیایی‌ها می‌باشد، افزایش می‌یابد [۲۸]. از طرفی با افزایش تعداد دفعات انفجار سوزن و افزایش نابیایی‌ها و خطوط لغزش مرزدانه ای ناشی از آن، به دلیل افزایش تشکیل مرزدانه، دانه‌های آستنیت به دانه‌های کوچکتری تقسیم بندی شده و سبب ریزدانه شدن و افزایش سختی سطحی فولاد می‌شود. با توجه به اینکه لایه سطحی سوزن ریل در تماس مستقیم با ماده منفجره می‌باشد و تحت بار ضربه ای با شدت بالا قرار داد، بیشترین عیوب کریستالی در سطح سوزن ریل اتفاق افتاده است و در نتیجه سبب ریزدانه شدن ریزساختار فولاد در لایه نزدیک سطح سوزن ریل می‌شود. این نکته حائز اهمیت است که به تدریج که انرژی امواج شوک در فلز کاهش می‌یابد، شدت نابیایی‌ها، عیوب انباشتگی و کریستال‌های دوقلوبی شده کاهش می‌یابند و سبب افت سختی در عمق سوزن ریل می‌شوند.

تحقیقات انجام شده درباره میزان تغییر شکل و نوع مکانیزم

کارسختی با فاصله از سطح در فولاد هدفیلد سختکاری انفجاری شده را نشان می‌دهد که باندهای تغییرشکل تا عمق ۱۰mm قابل مشاهده هستند و چگالی باندهای تغییرشکل با فاصله از سطح کاهش می‌یابد به گونه ای که به ندرت باندهای تغییرشکل در داخل دانه‌های آستنیت در عمق ۳۵-۱۰mm ایجاد شده اند. نوع مکانیزم کارسختی فولاد هدفیلد سختکاری انفجاری شده با فاصله از سطح متفاوت است، ابتدا دوقلوبی در عمق ۱۰mm ظاهر می‌شود و چگالی آن با کاهش عمق از سطح منفجر شده افزایش می‌یابد به طوری‌که چگالی بالایی از دوقلوبی‌های تغییرشکل متقاطع در عمق ۵mm از لایه زیرسطحی قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که دوقلوبی‌های متقاطع حاوی چگالی بالایی از نابیایی‌ها است و بیان کننده آن است که دوقلوبی و نابیایی در یک مکانیزم رقابتی در طول سختکاری انفجاری تشکیل می‌شوند. ریزساختار در عمق ۱۵mm غالباً ترکیبی از نابیایی‌ها و سلول‌های نابیایی است که به طور یکنواخت در داخل دانه‌های آستنیت توزیع شده اند که اثر کمی در نرخ کارسختی فولاد دارند [۱۳]. همچنین تحقیقات انجام شده توسط دینگ [۹] در عمق ۱۰/۲-۰mm از فولاد هدفیلد سختکاری انفجاری شده نشان می‌دهد که بیشترین چگالی نابیایی‌ها و خطوط لغزش متقاطع خم شده نزدیک سطح فولاد رخ می‌دهد و با پیشروی در عمق چگالی نابیایی‌ها و خطوط لغزش متقاطع کاهش می‌یابد. این در حالی است که دوقلوبی تغییر شکل تنها در لایه سطحی اتفاق می‌افتد و این مکانیزم هیچ اثری در افزایش کارسختی در لایه‌های زیرسطحی ندارد. لازم به ذکر است تا کنون هیچ گزارشی از تشکیل مارتنزیت بعد از سختکاری انفجاری در فولاد هدفیلد به کارگرفته شده در سوزن ریل مشاهده نشده است و استحاله مارتنزیتی هیچ نقشی در مکانیزم کارسختی در این فولاد ندارد.

هرچه ضخامت ماده منفجره یا تعداد دفعات انفجار افزایش یابد میزان نابیایی‌ها و عیوب انباشتگی بیشتری در لایه سطحی سوزن ریل اتفاق می‌افتد و منجر به سختی سطحی بالاتر می‌شود. نتایج سختی قطعه ریل بعد از دو بار انفجار مطابق جدول ۱۲ کاملاً مؤید این مطلب می‌باشد.

نقشه نقاط سختی سنجی شده ریل بعد از دوبار انفجار در شکل ۱۸ نشان داده شده است. سختی سنجی در هر نقطه مشخص شده ۵ بار انجام گرفت و میانگین سختی بدست آمد. نتایج سختی سنجی بعد از سختکاری انفجاری با دو بار انفجار در جدول ۱۲ آورده شده است. مطابق جدول ۱۲ سختی در همه نقاط بالای ۳۲۸HB می‌باشد و حتی در نقطه DR2 سختی



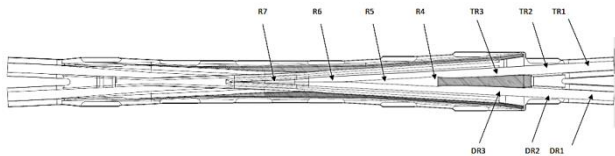
**Fig. 17** Specified points for obtaining the hardness related to the railway frog after one explosion

شکل ۱۷ نقاط سختی سنجی شده سوزن ریل بعد از یکبار انفجار

جدول ۱۱ نتایج سختی سنجی سوزن ریل بعد از یکبار انفجار

**Table 11** Obtained hardness values of the railway frog after one explosion

TR1	TR2	TR3	R4	R5	R6	R7	TL4	TL3	TL2	TL1	Point	
-۲۰۰	-۶۰۰	-۱۰۰۰					-۱۴۰۰	-۱۰۰۰	-۶۰۰	-۲۰۰	Coordinate	
۲۹۷	۳۰۸	۲۹۸	-۱۴۰۰	-۱۸۰۰	-۲۲۰۰	-۲۶۰۰	۲۵۰	۲۵۷	۲۹۵	۲۸۷	Hardness (HB)	
DR1	DR2	DR3	DL4	DL3	DL2	DL1	Point					
-۲۰۰	-۶۰۰	-۱۰۰۰					Coordinate					
			۳۰۶	۲۹۲	۲۴۸	۲۴۵	-۱۴۰۰	-۱۰۰۰	-۶۰۰	-۲۰۰	Hardness (HB)	
۳۱۱	۳۰۳	۲۶۷					۲۸۷	۲۶۲	۳۲۹	۲۵۹		



**Fig. 18** Specified points for obtaining the hardness related to the railway frog after two explosions

شکل ۱۸ نقشه نقاط سختی سنجی شده سوزن ریل بعد از دو بار انفجار

جدول ۱۲ نتایج سختی سنجی سوزن ریل بعد از دو بار انفجار

**Table 12** Obtained hardness values of the railway frog after two explosions

TR1	TR2	TR3	R4	R5	R6	R7	Point
-۲۰۰	-۶۰۰	-۱۰۰۰	-۱۴۰۰	-۱۸۰۰	-۲۲۰۰	-۲۶۰۰	Coordinate
۳۸۳	۳۷۸	۳۵۱	۳۲۸	۳۴۳	۳۳۰	۳۳۲	Hardness (HB)
DR1	DR2	DR3	Point				
-۲۰۰	-۶۰۰	-۱۰۰۰	Coordinate				
۳۵۲	۳۹۹	۳۴۹	Hardness (HB)				



**Fig. 19** Specified points for obtaining the hardness related to the railway frog after one explosion

شکل ۱۹ قطعه سوزن پس از عملیات انفجار روی آن

۴۰۰HB به دست آمده است. با توجه به اینکه سختی در همه نقاط بیشتر از ۳۲۱HB می‌باشد، نیازمندی‌های استاندارد EN15689 را تأمین می‌کند و می‌توان گفت که انطباق صد در صدی با این استاندارد دارا می‌باشد. نتایج سختی بدست آمده پس از دوبار انفجار سوزن ریل در آزمایشات انجام شده توسط هاوولیچک [۷] نشان می‌دهد که سختی در محدوده ۳۶۷-۳۲۷HB می‌باشد که با نتایج بدست آمده در این پژوهش تطابق زیادی دارد.

شکل ۱۹ قطعات پس از انجام سخت‌کاری انفجاری را نشان می‌دهد.



**Fig. 16** The railway frog work-hardening process

شکل ۱۶ سوزن پوشیده با صفحات ماده منفجره

## ۷- نتیجه‌گیری

سوزن‌ها به عنوان اتصال‌دهندگان دو مسیر متفاوت از سیستم حمل و نقل ریلی، نقش بسیار مهمی در راحتی و کاهش هزینه‌ها دارند؛ اما از طرفی به دلیل اعمال نیروهای سطح تماسی و ضربه‌ای هنگام تغییر مسیر به سطح سوزن، نگهداری و تعمیرات این قطعات هزینه‌های بسیار و نیروی کار زیاد می‌طلبند. از طرفی فرسایش و سایش در محل سوزن‌های سیستم حمل و نقل ریلی، به قطار و واگن‌های عبوری از آن نیز می‌تواند آسیب رسانده و سبب افزایش هزینه‌ها گردد. بنابراین به کارگیری راهکاری برای جلوگیری از فرسایش زود هنگام و افزایش مقاومت به سایش و شکست سوزن تحت بارهای سیکلی، یکی از مهمترین مسائل روز می‌باشد. از این رو، برای افزایش مقاومت به سایش و فرسایش سوزن از روش‌های سخت‌کاری متعددی استفاده می‌شود که یکی از پیچیدترین و در عین حال پرکاربردترین روش، سخت‌کاری انفجاری است. در این پژوهش ابتدا از طریق تحلیل عددی، میزان ماده منفجره برای رسیدن به سختی مناسب تحلیل شده و بدست آمده‌است. در ادامه با طراحی آزمایش مناسب مطابق با مراحل زیر آزمایش‌های سختی سنجی انجام شده‌است.

- مقدار ضخامت صفحات انفجاری ورقه‌ای بدست آمده برای قطعه کوچک مربوط به ریل راه‌آهن که بهترین نتیجه در میزان افزایش سختی را دارا بود، برابر ۵-۷ میلی‌متر بدست آمد. همچنین ضخامت ۴ میلی‌متر یک ضخامت بحرانی برای صفحه منفجره بوده که از این ضخامت به بالاتر، سختی‌های اندازه‌گیری شده افزایش چشم‌گیری داشتند.

- در مرحله اول قطعه ریل راه‌آهن به سه بخش A، B و C برش داده شده و ماده منفجره با ضخامت ثابت ۴ میلی‌متر بر روی تمام صفحات نصب شده و آزمایش انجام شد. نتیجه آن افزایش سختی در قطعات مختلف علی‌الخصوص قطعه سه وجهی از ۱۸۰HB به ۲۷۸HB که نتیجه آزمایشگاهی با نتایج عددی تطبیق داشت.

- در مرحله دوم، قطعه یکپارچه از ریل تحت انفجار با صفحات انفجاری با ضخامت‌هایی در محدوده ۵ تا ۸ میلی‌متر قرار گرفت و مشخص شد ضخامت ۷ و ۴ میلی‌متر برای صفحات انفجاری ورقه‌ای، مطابق تحلیل عددی، بهترین عملکرد را دارند. - در مرحله آخر، قطعه سوزن تحت بار انفجاری با ضخامت صفحات ۷ میلی‌متر قرار گرفته شد. به‌طوریکه سختی اندازه‌گیری شده قبل از فرایند انفجار برابر ۱۶۱HB بوده که بعد از انجام فرایند سخت‌کاری انفجاری در سوزن (بعد از یک بار

انفجار)، سختی در قسمت میانی سوزن ۲۴۶HB و سختی در قسمت بال شکل ریل در بازه ۳۲۹HB-۲۵۰ (میانگین سختی: ۲۸۶HB) می‌باشد و بعد از دو بار انفجار سختی در قسمت میانی سوزن ۳۳۳HB و سختی در قسمت بال شکل ریل ۳۶۸ HB می‌باشد. نتایج سختی بعد از دو بار انفجار انطباق زیادی با استاندارد EN15689 دارد.

## ۸- مراجع

- [1] Wiedorn J, Daves W, Ossberger U, Ossberger H, Pletz M. Numerical assessment of materials used in railway crossings by predicting damage initiation-Validation and application. *Wear*. 2018;414:136-50.
- [2] Kassa E, Nielsen JC. Dynamic interaction between train and railway turnout: full-scale field test and validation of simulation models. *Vehicle System Dynamics*. 2008;46:521-34.
- [3] Skrypnik R, Ossberger U, Pålsson BA, Ekh M, Nielsen JC. Long-term rail profile damage in a railway crossing: field measurements and numerical simulations. *Wear*. 2021;472:203331.
- [4] Bezin Y, Sarmiento-Carnevali M, Sichani MS, Neves S, Kostovasilis D, Bemment SD, et al. Dynamic analysis and performance of a repoint track switch. *Vehicle system dynamics*. 2019.
- [5] Sällström J, Dahlberg T, Ekh M, Nielsen J. State-of-the-art study on railway turnouts-dynamics and damage. Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. 2004.
- [6] Zhang F, Lv B, Wang T, Zheng C, Zhang M, Luo H, et al. Explosion hardening of Hadfield steel crossing. *Materials science and technology*. 2010;26:223-9.
- [7] Havlíček P, Bušová K. Experience with explosive hardening of railway frogs from Hadfield steel. METAL 2012-Conference Proceedings, 21st International Conference on Metallurgy and Materials: TANGER Ltd.; 2012.
- [8] HAVLÍČEK P, Nesvadba P. Application of explosive hardening on railway infrastructure parts. *Metal*. 2011;18:5.
- [9] Ding CG. Study on the Mechanical Behavior and Microscopic Mechanism of Explosive Working of High-Manganese Steel. *Advanced Materials Research: Trans Tech Publ*; 2011. pp. 506-12.
- [10] Guskov A, Milevsky K, Mihaylova N. Research of Gadfield steel structure after dynamic loading. 7th World conference on explosives & blasting 2013. pp. 143-6.
- [11] Macleod NA. Method of hardening manganese steel. Google Patents; 1955.
- [12] Champion AR, Rohde R. Hugoniot equation of state and the effect of shock stress amplitude and duration on the hardness of Hadfield steel. *Journal of applied physics*. 1970;41:2213-23.
- [13] Zhang M, Lv B, Zhang F, Feng X. Explosion deformation and hardening behaviours of Hadfield steel crossing. *ISIJ international*. 2012;52:2093-5.

- pressure vessel steels. *Metallurgical Transactions*. 1973;4:657-61.
- [23] Maranda A, Nowaczewski J, Przetakiewicz A. Explosive strengthening of the surface layer in St72P steel rails. *Journal of Materials Processing Technology*. 1992;34:241-5.
- [24] Zhang H, Subhash G, Jing X, Kecskes L, Dowding R. Evaluation of hardness–yield strength relationships for bulk metallic glasses. *Philosophical magazine letters*. 2006;86:333-45.
- [25] Khodabakhshi F, Haghshenas M, Eskandari H, Koohbor B. Hardness– strength relationships in fine and ultra-fine grained metals processed through constrained groove pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;636:331-9.
- [26] Gaško M, Rosenberg G. Correlation between hardness and tensile properties in ultra-high strength dual phase steels–short communication. *Mater Eng*. 2011;18:155-9.
- [27] Song M, Sun C, Chen Y, Shang Z, Li J, Fan Z, et al. Grain refinement mechanisms and strength-hardness correlation of ultra-fine grained grade 91 steel processed by equal channel angular extrusion. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2019;172:212-9.
- [28] Hu X, Shen Z, Liu Y, Liu T, Wang F. Influence of explosive density on mechanical properties of high manganese steel explosion hardened. *Journal of Applied Physics*. 2013;114:213507.
- [14] Kovács T, Völgyi B, Sikari-Nágl I. Hadfield steel hardening by explosion. *Materials Science Forum: Trans Tech Publ*; 2014. pp. 93-7.
- [15] Gronostajski J, Palczewski W. The effects of explosive hardening on the mechanical properties and structure of HSLA steels. *Journal of mechanical working technology*. 1989;18:293-303.
- [16] B. Eftestel BFH, P. Storvikand A. Windfeldt. High Energy Rate Working of Metals. Proc NATO Advanced Study Institute, Central Institute for Industrial Research, Oslo, Norway. 1964:296-311.
- [17] V.C. Stepanov PMSJSN, TloczenieWybuchowe, Warsaw. WNT. 1968.
- [18] A.G. Teslenko and L.P. Piastun F-K. *Met Mater*. 1973;6:96.
- [19] M.A. Krishtal ADL, S.N. Verkhovskii, V.S. Vakhrusheva, P.M. Yushkevich. *Met Sci Heat Treat*. 1978;20:489-93.
- [20] Orava R, Wittman R. High-Energy-Rate Deformation Processing and its TMP Applications. *Advances in Deformation Processing: Springer*; 1978. pp. 485-533.
- [21] Murr L, Korbonski J. Thermal recovery in 304 stainless steel following explosive shock loading and explosive forming. *Metallurgical Transactions*. 1970;1:3333-40.
- [22] Otto HE, Dowling AR, Sullivan RW. A comparison of the effects of explosive forming and static deformation on the mechanical properties of