



بررسی تجربی و شکست‌نگاری اثر عمق شیار با ضربه‌زن شارپی مجهز به کرنش‌سنج در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

علی حسین زاده^{۱*}، محمدرضا مرکی^۲، محسن سدیدي^۳ و امیرحسین حسنی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

^۲ مربی، دانشگاه صنعتی بیرجند، دانشکده مهندسی، گروه مواد و متالورژی

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی، گروه عمران

^۴ کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳

چکیده

در تحقیق حاضر آزمایش ضربه شارپی روی نمونه آلومینیوم ۷۰۷۵ با اندازه استاندارد ۱۰×۱۰×۵۵ میلی‌متر با عمق شیارهای مختلف انجام شده است و انرژی شکست شارپی برای هر یک اندازه‌گیری شده است. نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های شارپی با عمق شیارهای مختلف، توسط ضربه‌زن مجهز به کرنش‌سنج رسم شده است؛ سپس ارتباط بین انرژی شکست شارپی به‌عنوان تابعی از تغییرات عمق ترک اولیه تعیین گردیده است. با استفاده از این رابطه، می‌توان با داشتن ابعاد هندسی ترک اولیه با احتساب تیرانس‌های مجاز قید شده در استاندارد، میزان خطا در اندازه‌گیری انرژی شکست شارپی آلومینیوم مورد بررسی را تعیین کرد؛ هم‌چنین ریزساختار سطح شکست چند نمونه با عمق شیار مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهدات شکست‌نگاری نشان داده است که مکانیسم‌های مختلف شکست با تغییر عمق شیار نمونه‌ها از جمله شکست نرم-ترد، شکست شبه‌ترد و شکست ترد اتفاق افتاده است. با افزایش عمق شیار شکست تردتر اتفاق افتاده است که به علت افزایش کلیواژ و کاهش دیمپل در سطح شکست است؛ همچنین با افزایش عمق شیار، انرژی شکست بر اساس رابطه نمایی $E = 22.857e^{-0.355a}$ کاهش می‌یابد که با استفاده از این رابطه می‌توان مقدار دقیق انرژی شکست شارپی را برای هر عمق شیار دلخواه در آلومینیوم ۷۰۷۵ آزمایش شده محاسبه کرد.

کلمات کلیدی: آزمایش ضربه شارپی؛ شیار V شکل؛ اثر عمق شیار؛ صنعت هوافضا؛ شکست‌نگاری.

Experimental and Fractography Investigation of Notch Depth Effect by Instrumented Impact Pendulum in 7075 Aluminum Alloy

A. Hosseinzadeh^{1*}, M. R. Maraki², M. Sadidi³, A. Hassani⁴

^{1*} Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Instructor., Material. Eng., Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

³ MsC. Student, Civil. Eng., Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

⁴ MsC, Mech. Eng., Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Abstract

In the present study, the Charpy impact test on the 7075 aluminum sample performed in full size 55×10×10 mm with different notch depth and the fracture energy is measured. The force-displacement curves for Charpy samples with different notch depth were drawn by instrumented impact pendulum. Then the energy connection of the Charpy fracture is determined as a function of the changes in the initial crack depth. Using this relationship can determine the amount of error in measuring the energy fracture of the tested aluminum by measuring the available geometric dimensions of the initial crack including the allowable tolerances specified in the standard. Also, the microstructure of the fracture surface of several samples with different notch depth was investigated. Fractography observations showed that different fracture mechanisms occurred by changing the notch depth of the specimens, including ductile-brittle fracture, quasi-brittle fracture, and brittle fracture. As the depth of the notch depth increases, the fracture becomes more brittle, which is due to increase cleavage and decrease dimple in the fracture surface. Also, as the notch depth increases, the fracture energy decreases based on the $E = 22.857e^{-0.355a}$ exponential relationship, Using this equation, the exact amount of Charpy fracture energy can be calculated for each desired notch in the 7075 aluminum tested.

Keywords: Charpy Impact Test; V-Shaped Notch; Notch Depth; Aerospace Industry; Fractography.

۱- مقدمه

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ یک آلیاژ حرارتی و یکی از قوی‌ترین آلیاژهای آلومینیوم در صنایع صنعتی امروز است. نسبت استحکام به وزن بالای آن، همراه با ویژگی‌های قدیمی طبیعی، آن را برای کاربردهای ساخت‌وساز هواپیما جذاب کرده است [۱].

شکست ترد یکی از مهم‌ترین حالت‌های شکست است که باید در قابلیت اطمینان ساختار آلومینیومی در نظر گرفته شود؛ زیرا پس از شروع ترک، ترک‌های ترد می‌توانند منجر به خرابی ساختار شوند [۲].

وجود ناپیوستگی‌های هندسی مانند شیار یا سوراخ در یک جسم باعث توزیع غیریکنواخت تنش در اطراف آن یا همان تمرکز تنش می‌شود و همین عامل، علت اصلی کمتر بودن تنش شکست اعمالی از تنش شکست تئوری است؛ بنابراین تأثیر مضر وجود ترک، افزایش تنش موضعی و به وجود آمدن حالت تنش سه‌بعدی جلوی ریشه ترک است که تحت شرایط کرنش صفحه‌ای بارگذاری شده است [۳]. در سال‌های اخیر شیارهای U و V شکل بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ چون این شیارها مثال خوبی از بزرگ بودن شعاع منطقه پلاستیک در اطراف شیار می‌باشند [۴].

لوکاس و همکاران [۵]، به بررسی عددی اندازه شیار و تأثیر آن بر شکست نمونه آزمایش ضربه شاری ماده‌ای از مس-فولاد پرداختند. سیدنز و همکاران [۶]، به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی انرژی شکست نمونه‌های ضربه شاری برای عمق شیارهای متفاوت از ۲ تا ۷ میلی‌متر در فولاد A533B پرداخته‌اند. براتی و همکاران [۷]، تأثیر عمق و شعاع شیار U شکل در آزمایش ضربه شاری را بر مقدار متوسط چگالی انرژی کرنشی نمونه بررسی کردند. نظری و همکاران [۸]، به مطالعه موقعیت و عمق شیار از صفر تا ۳۰ میلی‌متر و اثر لایه‌های موجود در نمونه‌های آزمایش ضربه شاری از جنس فولاد مرتبه‌ای به‌منظور توقف رشد ترک پرداختند. صلواتی و همکاران [۹]، به بررسی تجربی و عددی اثر عمق و شعاع قوس شیار بر نیروی وارد شده در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای پرداخته‌اند. کوا و همکاران [۱۰]، تأثیر اندازه هندسی بر مقاومت به شکست آهن GJ400 را بررسی کردند. یو و همکاران [۱۱]، به بررسی تجربی و عددی اثر

عمق شیار بر انرژی شکست شاری در فولاد Q235 با اتصال چسب اپوکسی پرداخته‌اند. حسین زاده و هاشمی [۱۲]، به بررسی تجربی اثر عمق شیار بر انرژی شکست شاری در فولاد ایکس شصت‌وپنج پرداخته‌اند. در این تحقیق عمق شیارها از ۱/۲۵ تا ۳ میلی‌متر آزمایش شده و انرژی شکست نمونه استاندارد ۲۴۱ ژول گزارش شده است. لوزیو و همکار [۱۳]، به تجزیه و تحلیل نسبت شیار به‌اندازه نمونه با شیار U شکل و نمودار تأثیر اندازه برای مواد شبه ترد پرداخته‌اند. حسین زاده، مرکی و امام وردی [۱۴-۱۶]، به بررسی تجربی اثر عمق شیار، زاویه شیار و شعاع قوس شیار در آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته‌اند. مرکی و همکاران [۱۷]، به بررسی عددی اثر عمق شیار در نمونه‌های کشش پرداخته‌اند. حسین زاده و هاشمی [۱۸]، به بررسی تجربی و عددی اثر عمق شیار بر انرژی شکست شاری در فولاد ایکس شصت‌وپنج پرداخته‌اند. حسین زاده و همکاران به بررسی تجربی و ریزساختار اثر شعاع قوس شیار بر انرژی شکست شاری در آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته‌اند. آمبریز و همکاران [۱۹]، به بررسی انرژی شکست شاری نواحی مختلف آلومینیوم ۷۰۷۵ با پاندول مجهز شده و همچنین تحلیل ریزساختار سطح شکست پرداختند. حسین زاده و همکاران [۲۰]، به بررسی اثر عمق شیار V شکل بر چقرمگی شکست و ناحیه پلاستیک نوک ترک با استفاده از داده‌های آزمایش ضربه شاری در فولاد API X65 پرداخته‌اند. حسین زاده و همکاران [۲۳]، به بررسی اثر شعاع قوس شیار بر انرژی شکست شاری در آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته‌اند.

در تحقیق حاضر اثر عمق شیار V شکل بر انرژی شکست ضربه شاری از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ (T651) بررسی می‌شود. بدین‌وسیله رابطه‌ای بین انرژی شکست آلومینیوم ۷۰۷۵ و عمق شیار به دست می‌آید تا در صورت خطا در ساخت نمونه‌ها بتوان به کمک رابطه به‌دست آمده در این تحقیق، مقدار انرژی شکست استاندارد را محاسبه کرد؛ همچنین آزمایش نمونه‌ها با دستگاه تجهیز شده به کرنش‌سنج انجام و مقایسه نتایج حاصل از دستگاه مجهز و نتایج حاصل از دستگاه ضربه شاری انجام می‌شود. سطح شکست نمونه‌ها تحلیل ماکروگرافی می‌شود؛ همچنین شکست‌نگاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی از ۴ نمونه با عمق شیار مختلف انجام می‌شود.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی^۱ آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

ردیف	نام عنصر	درصد (%)
۱	سیلیسیوم	۰/۰۰۹
۲	آهن	۰/۱۶۲
۳	مس	۱/۰۴۳
۴	منگنز	۰/۰۱۰
۵	منیزیم	۰/۰۷۱
۶	کروم	۰/۱۹۸
۷	روی	۴/۰۴۶
۸	نیکل	۰/۰۰۲
۹	تیتانیوم	۰/۰۷۴
۱۰	سرب	۰/۰۱۲
۱۱	قلع	۰/۰۰۰
۱۲	وانادیم	۰/۱۲۴
۱۳	زیرکونیم	۰/۰۹۷
۱۴	استرانسیم	۰/۰۰۳
۱۵	نقره	۰/۰۲۰
۱۶	بریلیوم	۰/۰۰۱
۱۷	کلسیم	۰/۰۰۲
۱۸	کادمیم	۰/۰۰۱
۱۹	کبالت	۰/۰۰۵
۲۰	گالیم	۰/۳۰۰
۲۱	آنتیموان	۰/۰۱۸
۲۲	بور	۰/۰۱۱
۲۳	بیسموت	۰/۱۵۰
۲۴	آلومینیوم	۹۲/۶۴۲

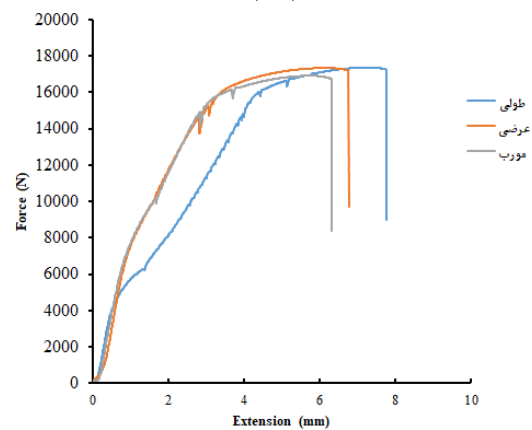
۲- آزمایش تجربی

فلز پایه مورد استفاده یک صفحه آلومینیومی T651-۷۰۷۵ با ابعاد ۲۰۰۰ میلی‌متر × ۱۰۰۰ میلی‌متر × ۱۰ میلی‌متر بود. جزئیات ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلومینیوم T651-۷۰۷۵ در جدول ۱ و جدول ۲ به ترتیب نشان داده شده است.

برای تشخیص ایزوتروپی آلومینیوم مورد آزمایش مطابق شکل ۱- الف در سه جهت مختلف آزمایش کشش انجام شده است و مدول الاستیسیته برای هر سه مورد ۷۲ گیگاپاسکال گزارش گردید که نشان دهنده ایزوتروپی این ماده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) نمونه‌های کشش در سه جهت و ب) نمودار نیرو-جابجایی آزمایش کشش در سه جهت

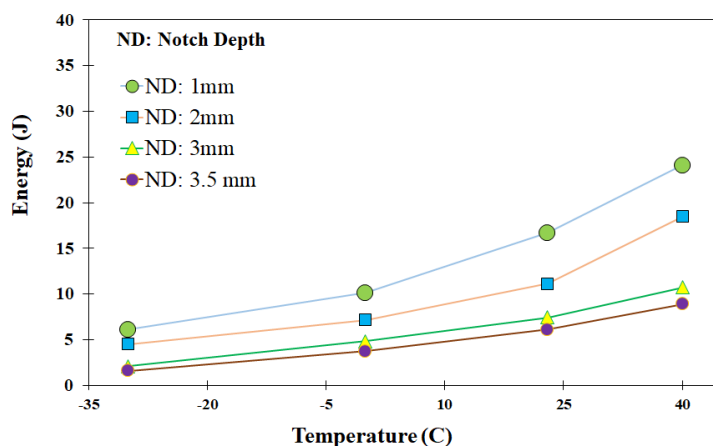
^۱ عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری در سطوح اطمینان ۹۵٪ (Confidence Levels=95%) و ضریب همپوشانی ۲ (Coverage Factor K=2) برآورد گردیده است. آنالیز شیمیایی با دستگاه کوانتومتر Solaris OES Plus ساخت کمپانی GNR ایتالیا کالیبره شده توسط نمونه‌های مرجع SUS.

همچنین تعداد ۹ نمونه ضربه شارپی آلومینیوم ۷۰۷۵ با عمق شیارهای متفاوت (۱ تا ۳ میلی‌متر) تحت سیکل عملیات حرارتی T6 (انحلال‌سازی در دمای ۴۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲۰ دقیقه و خنک‌سازی در آب و سپس رسوب‌زایی در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت) قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، پس از عملیات حرارتی کلیه نمونه‌ها با عمق

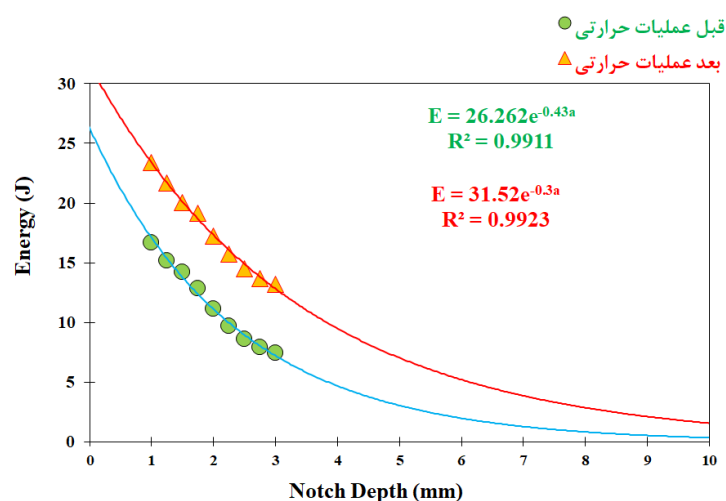
تاثیر دما بر انرژی شکست شارپی در آلومینیوم ۷۰۷۵ مطابق شکل ۲ است. بدین منظور ۴ نمونه با عمق شیارهای ۱، ۲، ۳ و ۳/۵ میلی‌متر در دماهای -۳۰، صفر، ۲۳ و ۴۰ درجه سلسیوس آزمایش ضربه شارپی شده است. برای هر نمونه سه بار تکرار شده و انرژی شکست شارپی میانگین در شکل ۲ گزارش شده است. با افزایش دما انرژی شکست افزایش می‌یابد.

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T651

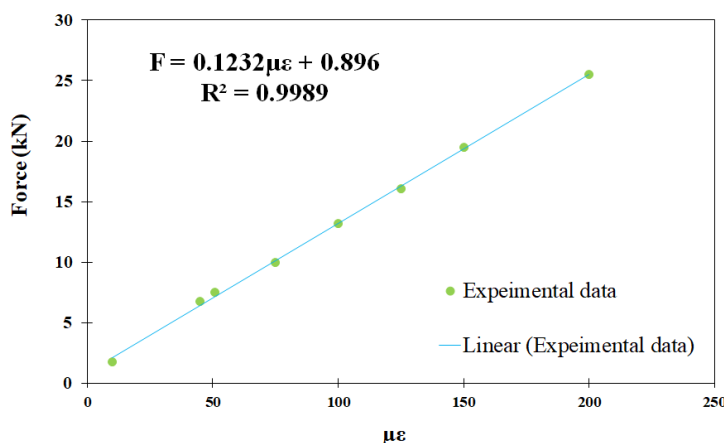
تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون	ازدیاد طول (%)	میکروسختی (میکروویکرز)
۵۲۹/۷۸	۵۹۳/۴۵	۷۲	۰/۳۳	۱۲/۰۴	۳۹



شکل ۲- نمودار انرژی-دما برای آلومینیوم ۷۰۷۵



شکل ۳- نمودار تاثیر عملیات حرارتی برای آلومینیوم ۷۰۷۵



شکل ۶- نمودار نیرو-کرنش کالیبره کردن ضربه‌زن

با استفاده از ماشین ضربه شاری با ظرفیت ۲۵ ژول، ۴۰ ژول و ۳۰۰ ژول با ضربه زن C شکل، چکش با شعاع ۸ میلی‌متر در دمای ۲۳ درجه سلسیوس انجام شد.

آزمایش ضربه شاری برای هر نمونه ۳ بار تکرار شده و میانگین انرژی شکست به دست آمده است. لازم به ذکر است، آزمایش نمونه‌ها ابتدا با دستگاه ضربه شاری با ظرفیت ۲۵ ژول انجام شد، ولی نمونه بدون شیار، انرژی شکستی بیشتر از ظرفیت ۸۰ درصد دستگاه نمایش داد، سپس آزمایش با ماشین ۴۰ ژول دوباره تکرار شد و مجدد انرژی شکست گزارش شده بیشتر از ۸۰ درصد ظرفیت دستگاه بود. در نهایت با دستگاه ۳۰۰ ژول آزمایش شد و انرژی شکست نهایی گزارش شد.

برای ارزیابی مقاومت در برابر ضربه از پاندول شاری مجهز به کرنش‌سنج استفاده شد. کرنش‌سنج‌ها متصل به مدار الکتریکی پل واتسون می‌باشند.

ارزیابی کرنش چکش توسط یک سیستم دستیابی به داده در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز طبق استاندارد ASTM E2298 دیجیتالی شد. قبل از آزمایش ضربه، چکش در شرایط استاتیکی با استفاده از نیروهای مختلف با دستگاه هیدرولیک کالیبره شد تا ارزیابی کرنش-نیرو در شرایط الاستیک را به دست آورد (شکل ۵). کرنش‌سنج‌ها بر اساس ISO 14556 کالیبره شدند.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در آزمایش ضربه شاری کلیه نمونه‌ها شکسته شده‌اند و همچنین انرژی شکست نهایی کمتر از ۸۰ درصد ظرفیت دستگاه است که

ماشین ضربه باشد، نباید با مقادیر دیگر میانگین‌گیری شود. در حالت نزدیک شدن انرژی ضربه به ۸۰ درصد ظرفیت انرژی ماشین سرعت پاندول در مدت شکستن نمونه بیش از حد کاهش می‌یابد (تقریباً ۴۵ درصد سرعت اولیه). حال آنکه آزمایش در حالت ایده‌آل باید با سرعت برخورد ثابت انجام شود؛ بنابراین کاهش سرعت بیش از حد در این حالت باعث می‌شود، مقادیر انرژی به دست آمده دارای دقت کافی نباشند [۲۰].

برای آماده‌سازی نمونه‌ها از ماده اولیه، قطعات تحت فرایند ماشین‌کاری قرار می‌گیرند. اندازه، تلورانس و مشخصات شیار از جمله ویژگی‌های قابل‌توجه در ساخت نمونه‌ها می‌باشند. نمونه ماشین‌کاری شده پس از عملیات حرارتی نهایی، همه مراحل ماشین‌کاری و شیارزنی انجام گیرد. مگر اینکه ثابت شود که مشخصات ضربه‌ای نمونه‌های قبل از عملیات حرارتی و پس از آن دقیقاً مشابه یکدیگر است. شیار می‌بایست کاملاً صاف باشد و از آنجا که تغییر در اندازه‌های شیار در نتایج آزمایش بسیار تأثیرگذار است، نمونه استاندارد نمونه شاری با شیار V شکل است. ثابت شده است که صافی سطح زیاد ضروری نیست، اما پرداخت سطح ۲ میکرومتر برای سطح دارای شیار و سطح مقابل آن و ۴ میکرومتر برای سایر سطوح الزامی است. شیار می‌تواند به هر روشی زده شود، ولی باید با دقت زده شود تا بر سطح مقابل سوراخ (محل آغاز شکست نمونه) آسیب نبیند [۲۰].

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، ۳۹ نمونه ضربه شاری در ۱۳ گروه ۳ تایی در نظر گرفته شد. آزمایش ضربه

برای هر عمق شیار یکبار با ضربه زن مجهز به کرنش سنج آزمایش شاری انجام شد. نمودار نیرو- زمان و کرنش- زمان از کرنش سنجها گزارش شد. با حذف زمان نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر عمق شیار به دست می‌آید و با مقدار میانگین انرژی شکست ۳ نمونه که تکرار شده‌اند، مقایسه می‌شود.

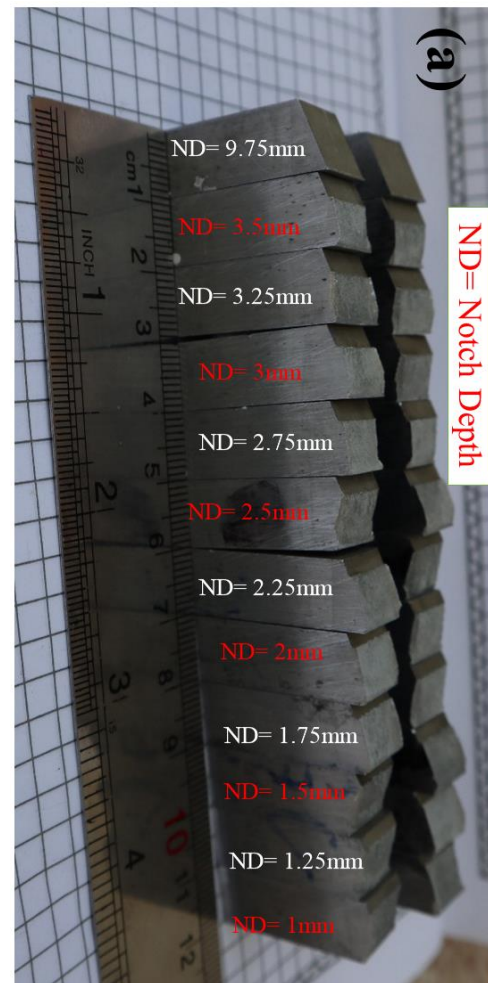
با توجه به اینکه تنها پارامتر متغیر عمق شیار است، نباید سایر پارامترها (زاویه شیار، شعاع قوس شیار و غیره) تغییر کرده باشد، لذا ابعاد نمونه‌ها (ضخامت، طول و عرض) با میکرومتر اندازه‌گیری گردید. ابعاد طول نمونه‌ها با میکرومتر ۰.۰۱-۰.۰۵ میلی‌متر و ابعاد عرض و ضخامت با میکرومتر ۰.۰۱-۰.۰۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. ابعاد شیار نمونه‌ها (عمق، زاویه و شعاع قوس شیار) با دوربین عکس برداری با لنز ماکرو و نرم‌افزار پردازش تصویر دیجیمایزر به دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در این نرم‌افزار هر تصویر ابعاد ۴۰۱۶×۶۰۱۶ پیکسل را داراست.

۳- شکست‌نگاری

۳-۱- ماکروگرافی

سطح شکست نمونه ضربه نیز شامل، سه قسمت رشته‌ای، شعاعی و ناحیه با لبه‌های برشی است. شکل ۸ بخش‌های مختلف سطح شکست نمونه ضربه را بعد از آزمایش ضربه شاری نشان می‌دهد. ریزساختار قسمت شعاعی نمونه که سطحی صاف و دانه‌ای مانند با بازتابندگی زیاد و ظاهری براق دارد شامل، کلیواژ است که حاکی از شکست ترد است؛ بنابراین هر چه سهم این قسمت زیاد باشد، شکست از حالت رشته‌ای نرم به حالت ترد نزدیک می‌شود. هر دو ناحیه رشته‌ای و ناحیه با لبه برشی نشانگر شکست نرم است. به همین دلیل است که علاوه بر درصد انقباض نمونه که معیاری از نرمی در آزمون ضربه گاهی اوقات درصد برشی شدن هم که نشانگر میزان ناحیه با لبه برشی است، به‌عنوان معیاری از نرمی در آزمایش ضربه شاری گزارش می‌شود. ریزساختار در هر دو ناحیه رشته‌ای و برشی شامل دیمپل است، با این تفاوت که دیمپل در ناحیه برشی به صورت کشیده و در ناحیه رشته‌ای به صورت هم‌محور است. همان‌طور که در شکل مشخص است، شکست در ناحیه برشی

نشان از صحت انجام آزمایش است. این دستگاه مجهز به سیستم نمایش انرژی بوده و به‌صورت دیجیتال انرژی شکست نمونه‌ها را می‌توان از روی صفحه مانیتور آن قرائت کرد.

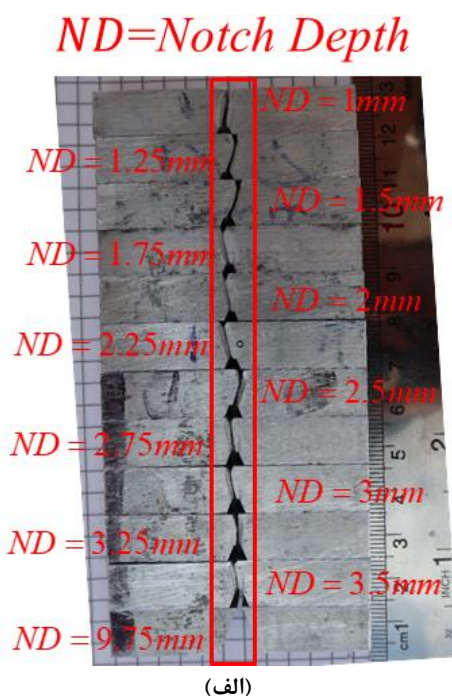


(الف)



(ب)

شکل ۷- نمونه‌های بعد از آزمایش ضربه شاری با عمق شیارهای متفاوت (الف) از ۱ تا ۹/۷۵ میلی‌متر و (ب) بدون شیار



(الف)



(ب)

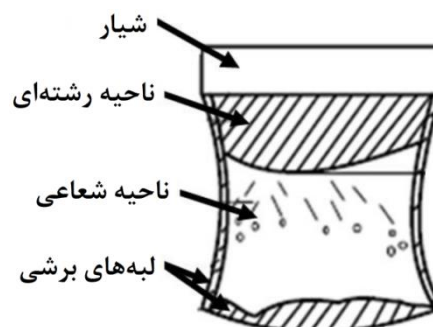
شکل ۹- انتشار ترک در نمونه‌های شاری برای؛

الف) شیارهای مختلف و ب) بدون شیار

دانه نسبت داده شده است. دانه‌های دراز تولید شده توسط تغییر شکل زیاد مقاومت ماده را افزایش می‌دهد، اما شکل‌پذیری آن را کاهش می‌دهد. این جنبه باعث افزایش انتشار ترک در امتداد مرزهای دانه در زیر یک مسیر مستقیم (شکست ترد) می‌شود. از طرف دیگر، در نمونه بدون شیار، ساختار دانه تمایل به کشیدگی کمتری دارد، یعنی موانع بیشتری برای انتشار ترک وجود دارد. این ساختار انتشار ترک را به‌عنوان تابعی از مورفولوژی دانه (تکثیر بین‌دانه‌ای) تولید می‌کند و مقدار مشخصی از انرژی ضربه در طی تغییر شکل پلاستیک مصرف می‌شود.

۳-۲- میکروگرافی

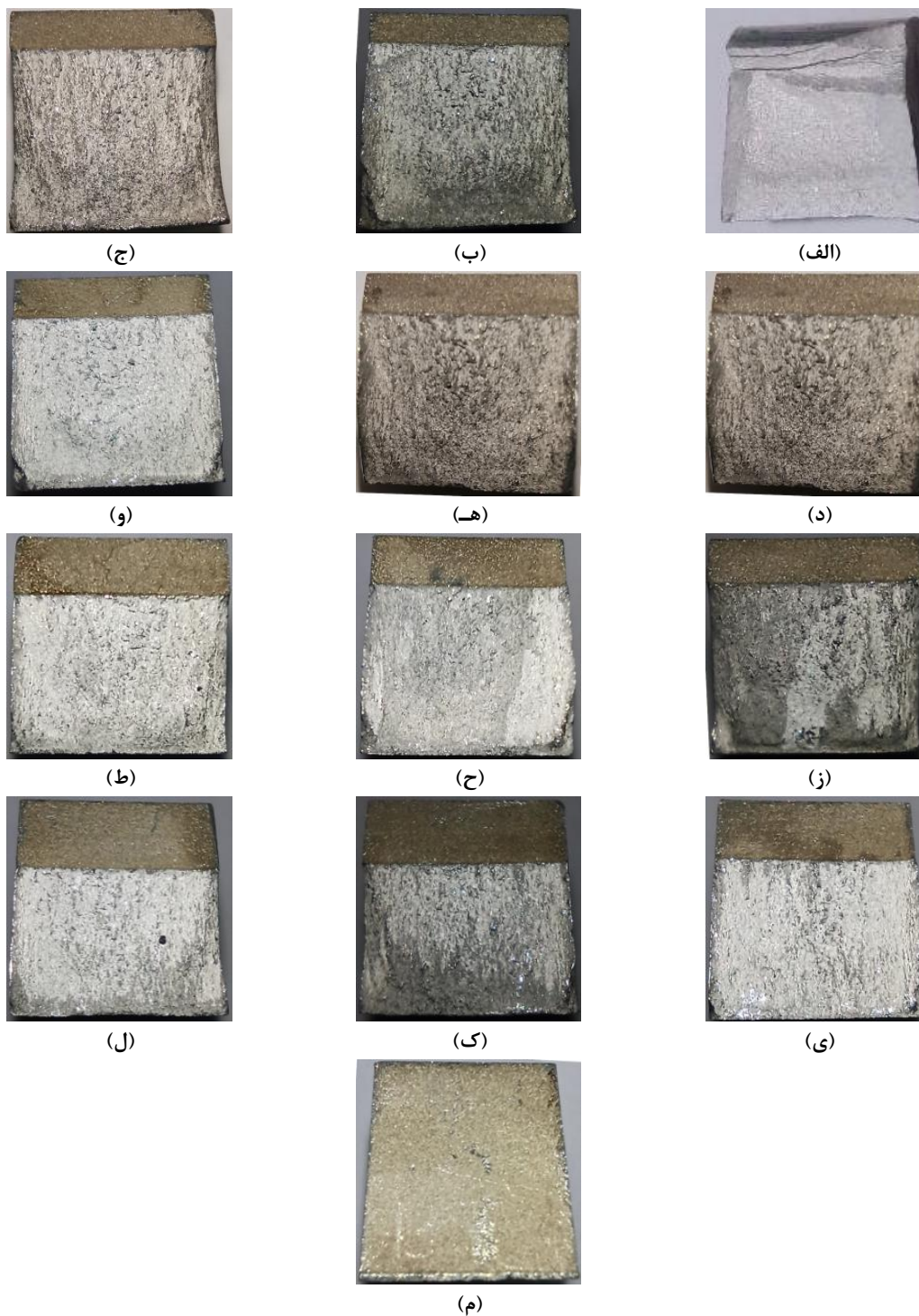
سطح شکست چهار نمونه با عمق شیارهای ۱/۵، ۲، ۲/۷۵ و ۳ میلی‌متر توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی در چهار



شکل ۸- تصویر نمادین از سطح شکست نمونه ضربه در مقیاس ماکرو [۲۸]

هم به‌صورت رشته‌ای است. در واقع شکست رشته‌ای ابتدا در اطراف سطح بیرونی نمونه یعنی همان لبه برشی ظاهر می‌شود که قید سه‌بعدی حداقل است [۲۸]. دیمپل به فرورفتگی‌های فنجان‌ی شکل که بسته به حالت تنش به شکلی است و معمولاً در شکست نرم رخ می‌دهد. به تمایل بلورها برای شکست در امتداد صفحات بلوری خاص، رخ یا کلیواژ گفته می‌شود. این سطوح معمولاً دسته صفحات با چگالی اتمی کم و فاصله زیاد هستند. شکل ۱۰ سطح شکست نمونه‌های با عمق شیار مختلف را بعد از آزمایش ضربه شاری در مقیاس میکروسکوپی برای مقایسه اثر عمق شیار در سطح شکست نشان می‌دهد. شکست ترد برای نمونه‌های شیاردار با یک سطح صاف و بدون انبساط جانبی مشخص می‌شود. اگرچه، برای سطح شکست نمونه بدون شیار (شکل ۱۰ الف)، گسترش جانبی نسبت به نمونه‌های شیاردار مشهود است؛ در نتیجه، انرژی شکست برای نمونه بدون شیار از نمونه با شیار بیشتر است (شکل ۱۵). همان‌طور که مشخص است، فقط قسمت رشته‌ای و ناحیه لبه‌های برشی در سطح شکست دیده می‌شود و ناحیه شعاعی در سطح شکست وجود ندارد. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش عمق شیار سطح شکست صاف‌تر شده و به شکست ترد میل می‌کند و همچنین لبه برشی کاهش می‌یابد.

شکل ۹ نمونه‌های شکسته شاری ۷ شکل برای عمق شیارهای مختلف آلومینیوم ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد. انتشار ترک برای نمونه‌های دارای شیار (شکل ۹ الف) با نیروی ضربه نرمال تراز شده. با این حال، برای نمونه بدون شیار، انتشار ترک یک الگوی زیگزاگ را توصیف می‌کند (شکل ۹ ب). در هر دو مورد، این خصوصیات به مورفولوژی ساختار



شکل ۱۰- سطح شکست ماکرو نمونه‌های ضربه شاریبی آلومینیوم ۷۰۷۵ با عمق شیار: الف) نمونه بدون شیار، ب) ۱ میلی‌متر، ج) ۱/۲۵ میلی‌متر، د) ۱/۵ میلی‌متر، ه) ۱/۷۵ میلی‌متر (۲ میلی‌متر، ز) ۲/۲۵ میلی‌متر، ح) ۲/۵ میلی‌متر، ط) ۲/۷۵ میلی‌متر، ی) ۳ میلی‌متر، ک) ۳/۲۵ میلی‌متر، ل) ۳/۵ میلی‌متر، م) ۹/۷۵ میلی‌متر

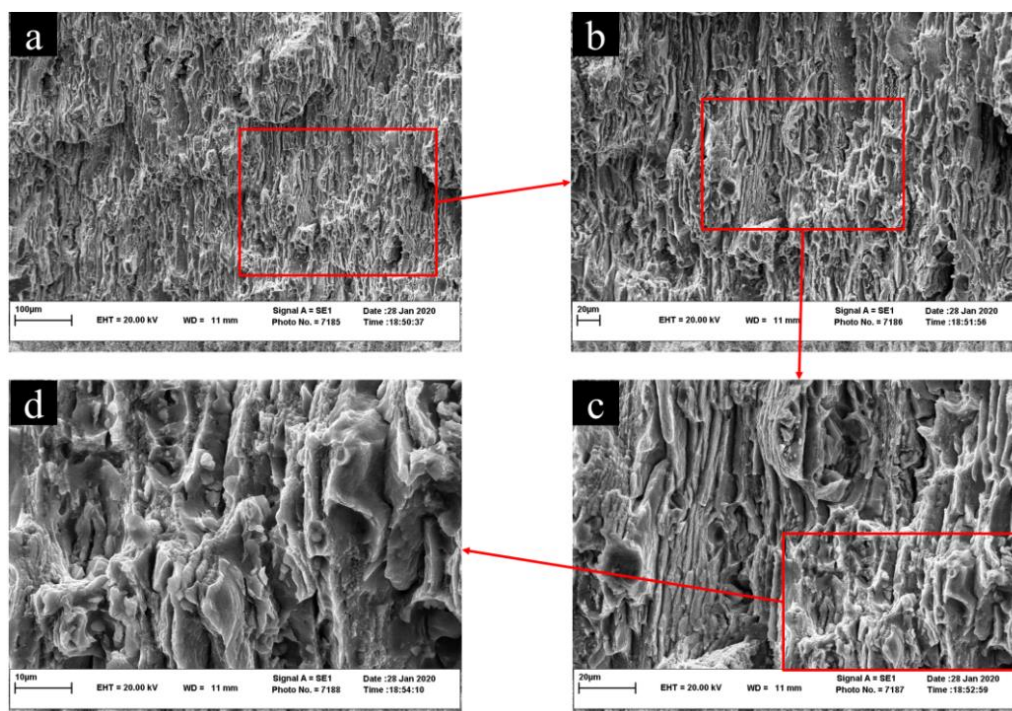
با سطح بالای نرمی (دیپمیل) در مقایسه با عمق شیار بالا مشاهده شد.

جزئیات بیشتر در مورد سطح شکست در قسمت c و d شکل‌های ۱۱-۱۴ در بزرگنمایی بیشتر ارائه شده است. یک شکست بین‌دانه‌ای برای عمق‌های شیار بالا مشاهده شد (شکل ۱۴ d)). در فلزات، این مکانیسم شکست به‌طور معمول مربوط به خوردگی بین‌دانه‌ای است [۲۹]. در این حالت، فاز ترد با حضور رسوبات (پیرمصنوعی T6) فراهم می‌شود که باعث افزایش سخت شدن مواد می‌شود، اما باعث نرمی می‌شود. از طرف دیگر، برای همه عمق‌ها، چند ذره ترک‌خورده مشاهده شد و برخی از میکرو-شکاف‌ها هسته شدند، یعنی شکست نرم (برای عمق شیار بالا شکست نرم-ترد، برای نمونه استاندارد شکست شبه ترد و برای عمق شیارهای بالا شکست کاملاً ترد اتفاق می‌افتد). با این وجود، درجه بالایی تغییر شکل (نورد سرد) در آلیاژ امکان ادامه کار با مکانیسم نرم را نمی‌دهد، در عوض شکست تمایل به دنبال کردن مسیر مستقیم دارد که توسط نقشه‌های کلیواژ موازی مشخص می‌شود.

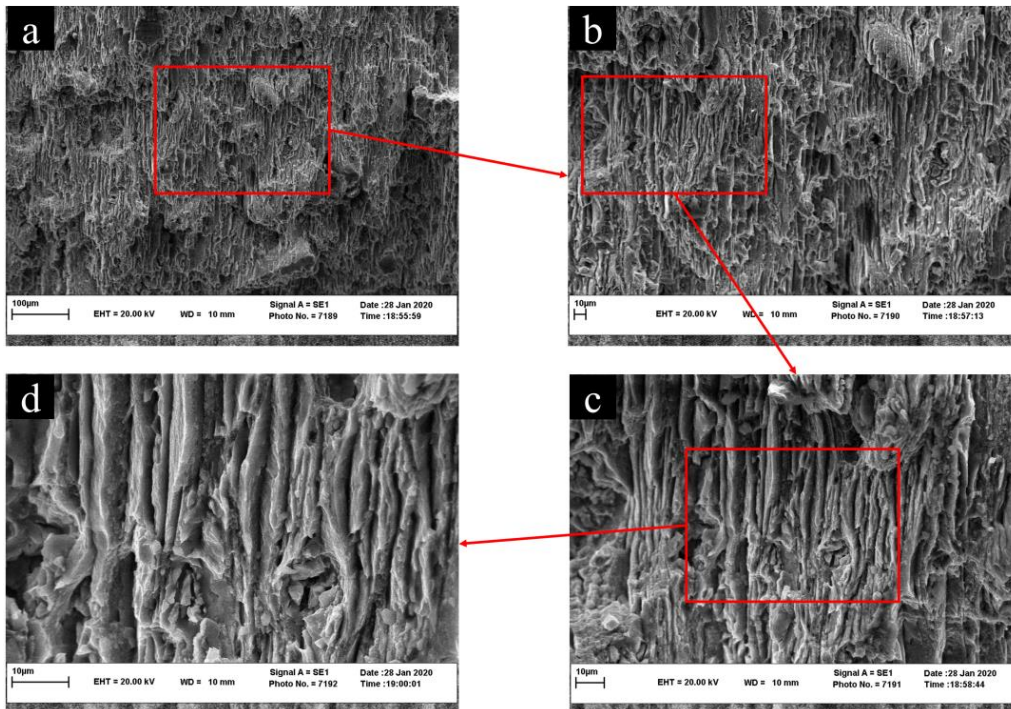
بزرگنمایی ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۵۰۰۰ برابر تصویربرداری شد. به‌منظور پاک‌سازی سطح شکست ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در حمام التراسونیک قرار گرفتند.

شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ سطوح شکست گرفته شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. چندین مکان شروع ترک در نمونه‌های با عمق شیار بالا مشاهده شد (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). این ترک‌ها در امتداد مرزهای دانه عملاً بدون شکل‌گیری دیپمیل، به‌عنوان شکست شبه ترد تکثیر می‌شوند. ویژگی‌های شکست ترد با برخی از شواهد نرمی منعکس شده توسط مناطق فیبر و مقداری دیپمیل وجود دارد. این ویژگی‌ها تمایل به افزایش نرمی مواد که زمان شکست و انرژی شکست افزایش می‌یابد.

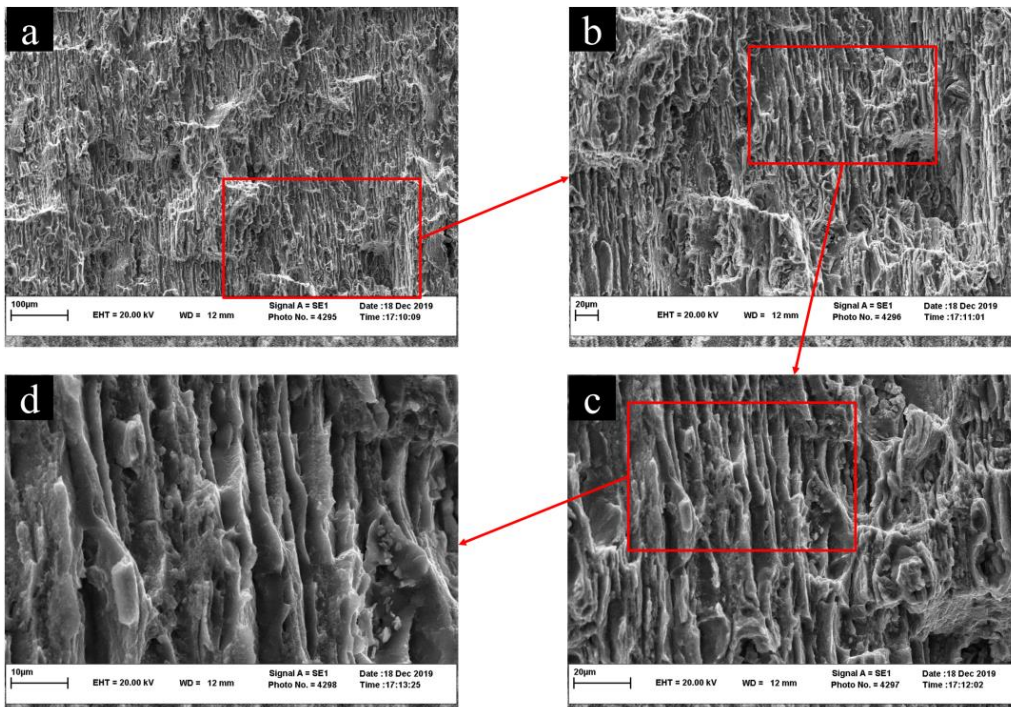
در مقابل، یک شکست نسبتاً نرم برای نمونه با عمق شیار پایین مشاهده شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). این سطوح شکست توسط هسته‌زایی، رشد و انسجام میکروویدها تولید شده توسط فرآیند تغییر شکل در طول ضربه مشخص می‌شود. با این حال، انرژی شکست بیشتر از نمونه‌های با عمق شیار بالا است. برای نمونه‌های با عمق شیار پایین، یک سطح شکست



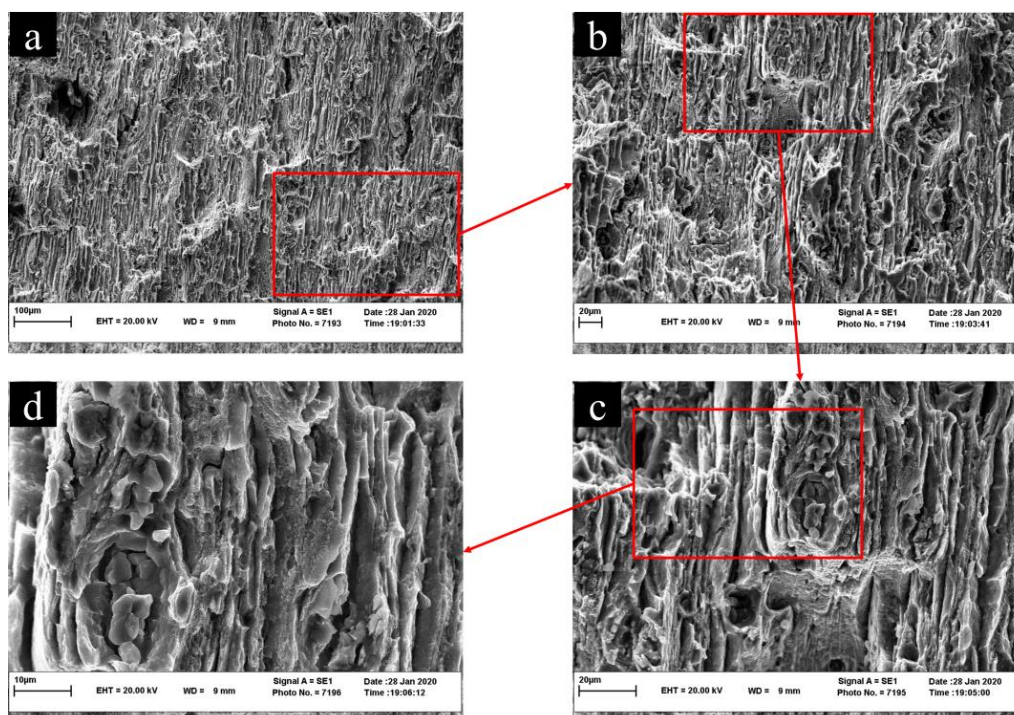
شکل ۱۱- ریزساختار سطح شکست نمونه شارپی با عمق شیار ۱/۵ میلی‌متر با بزرگنمایی (الف) ۵۰۰ برابر، (ب) ۱۰۰۰ برابر، (ج) ۲۵۰۰ برابر و (د) ۵۰۰۰ برابر



شکل ۱۲- ریزساختار سطح شکست نمونه استاندارد ضربه شاری با بزرگنمایی (الف) ۵۰۰ برابر، (ب) ۱۰۰۰ برابر، (ج) ۲۵۰۰ برابر و (د) ۵۰۰۰ برابر



شکل ۱۳- ریزساختار سطح شکست نمونه شاری با عمق شیار ۲.۷۵ میلی متر با بزرگنمایی (الف) ۵۰۰ برابر، (ب) ۱۰۰۰ برابر، (ج) ۲۵۰۰ برابر و (د) ۵۰۰۰ برابر



شکل ۱۴- ریزساختار سطح شکست نمونه شارپی با عمق شیار ۳.۵ میلی‌متر با بزرگنمایی (الف) ۵۰۰ برابر، (ب) ۱۰۰۰ برابر، (ج) ۲۵۰۰ برابر و (د) ۵۰۰۰ برابر

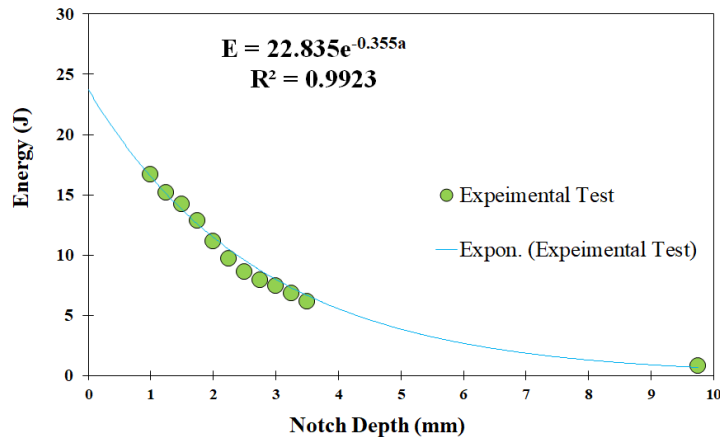
فرورفتگی بیشتری دارند و ظاهر سطوح با حفرات بزرگ که درون آن رسوبات و ناخالصی‌ها قرار دارند دیده می‌شود.

۵- نتایج و بحث

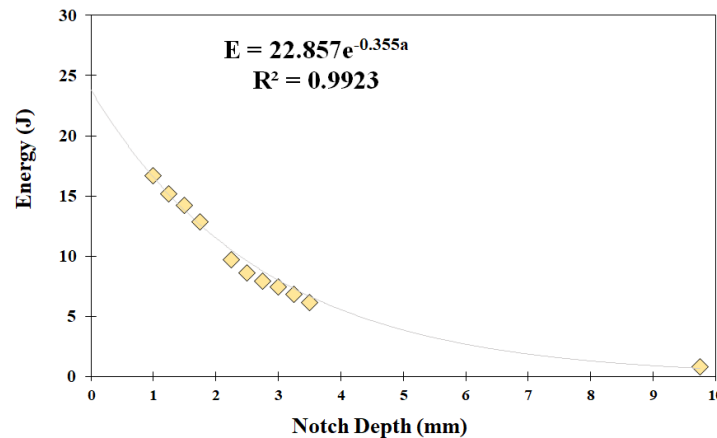
با انجام آزمایش ضربه شارپی روی نمونه‌های آزمایشگاهی با تغییر عمق شیار انرژی شکست نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس میانگین انرژی شکست ۳ نمونه از هر عمق شیار به دست آمد که این نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شکل ۱۵ نمودار انرژی شکست شارپی برحسب عمق شیار نمونه‌ها را نشان می‌دهد که در این نمودار رابطه نمایی در نظر گرفته شده است.

برای اطمینان از رابطه نمایی به‌دست آمده، نمونه استاندارد را از داده‌های تجربی حذف کرده و در رابطه به‌دست آمده، داده نمونه استاندارد بر اساس آزمایش تجربی را جایگذاری می‌کنیم و درصد خطای رابطه نمایی را مشخص می‌کنیم. شکل ۱۶ نمودار انرژی شکست شارپی برحسب عمق شیار بدون در نظر گرفتن انرژی شکست عمق شیار استاندارد را نشان می‌دهد.

با توجه به تصاویر SEM مشاهده شد که در عمق شکست پایین میکرو دیمپل‌ها و حفرات بسیار وجود دارند و شکل ظاهری به‌صورت ناهموار و حفره فنجان‌ی است و در عمق شکست بالاتر ظاهر سطوح به‌صورت صاف و یکنواخت است. با افزایش عمق شیار منطقه مومسانی جلو ترک که به بسته شدن ترک کمک می‌کند و همچنین واکنش و برخورد میکرو دوقلوبی‌ها کمتر می‌شود که به شکست نرم کمک می‌کنند. شکل ۱۱ دیمپل‌های کروی دیده می‌شود، در صورتی که شکل ۱۲ کمتر می‌شود و در شکل ۱۴ دیمپل‌ها از حالت کروی خارج شده و ظاهر شکست ترک‌های موازی (رگه‌ای) جهت‌دار دارند. به دلیل تغییر شکل پلاستیک کمتر در صفحات لغزش و سرعت بالای رشد ترک است. به ترتیب در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳، ۱۴، ترک‌ها جهت‌گیری ترجیحی بیشتری به دلیل تمرکز تنش بالا و پیشروی راحتی در راستای حرکت ترک‌ها دارند؛ همچنین به دلیل سرعت بیشتر، انتشار ترک باعث شده ترک‌هایی که به دلیل جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها به‌وجود آمده‌اند، کمتر شده، اما در سطوح شکست عمق شیار پایین حفرات و دیمپل‌ها، برآمدگی و



شکل ۱۵- نمودار انرژی شکست نمونه‌ها برحسب عمق شیار



شکل ۱۶- نمودار انرژی شکست نمونه‌ها برحسب عمق شیار بدون احتساب نمونه استاندارد

شیار (دلخواه)، می‌توان انرژی شکست نمونه را برای این آلومینیوم تعیین کرد.

شکل ۱۷ و شکل‌های ۲۱-۳۱ پیوست رفتار نیرو-جابجایی ضربه‌زن را در نمونه‌های شاریبی V شکل برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T651 نشان می‌دهد. در کلیه مواد، نوسانات بار به‌عنوان تابعی از زمان مشاهده شد. این نوسانات ترکیبی از یک نیروی شبه استاتیک متناسب با نمونه خمشی (مد اول) و یک نیروی دینامیکی مربوط به لرزش نمونه در اطراف پیکربندی تعادل آن در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. نوسانات در طول ضربه به‌عنوان ترکیبی از مدهای لرزش نمونه متقارن اول و دوم با غلبه بر مد اول ظاهر می‌شوند [۲۵].

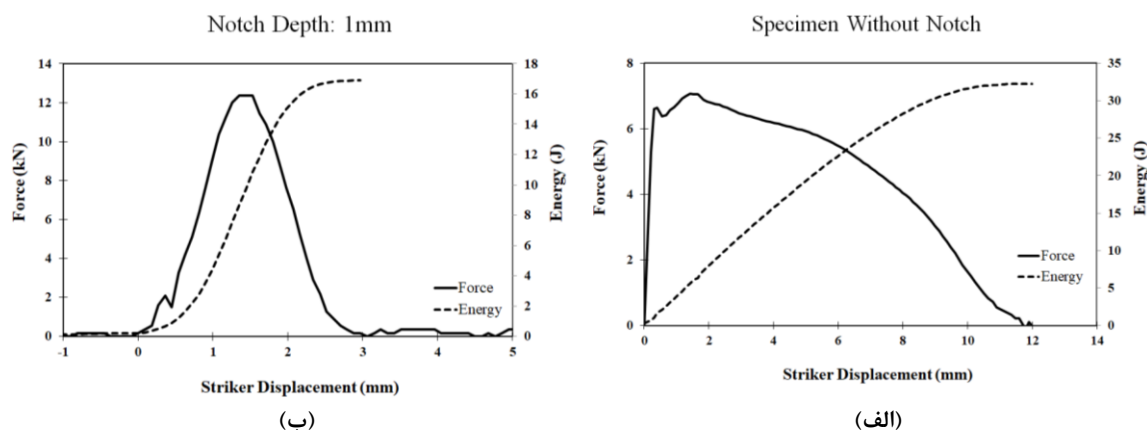
رابطه نمایی برای آلومینیوم آزمایش شده مطابق رابطه (۱) است:

$$E = 22.8357e^{-0.355a} \quad (1)$$

با توجه به شکل ۱۶ انرژی شاریبی بدون احتساب نمونه استاندارد را می‌توان از رابطه (۲) به دست آورد:

$$E = 22.857e^{-0.355a} \quad (2)$$

در این رابطه E انرژی ضربه برحسب ژول و a عمق شیار برحسب میلی‌متر است. با استفاده از رابطه (۲) و با جایگذاری مقدار استاندارد عمق شیار (۲ میلی‌متر) مقدار انرژی شکست شاریبی برابر ۱۱/۲۳ ژول به دست می‌آید که با نتایج تجربی (۱۱/۱۴ ژول) تطابق دارد (۰/۸۱ درصد خطا). یکی از مزایای رابطه نمایی به‌دست آمده این است که با معلوم بودن عمق



شکل ۱۷- نمودارهای نیرو-جابجایی چکش به دست آمده از کرنش‌سنج‌ها و نمودارهای انرژی-جابجایی چکش؛
 (الف) نمونه بدون شیار و (ب) نمونه با عمق شیار ۱ میلی‌متر

ضربه شارپی با ماشین مجهز شده به دست آمده است؛ همچنین نمودارهای انرژی-جابجایی به دست آمده از روش دوزنقه در شکل‌های ۱۹ و ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، با افزایش عمق شیار، انرژی شکست کاهش می‌یابد که یکی از عوامل مربوط به کاهش سطح مقطع است.

وجود ناپیوستگی‌های هندسی مانند شیار یا سوراخ در یک جسم باعث توزیع غیریکنواخت تنش در اطراف آن یا همان تمرکز تنش می‌شود و همین عامل علت اصلی کمتر بودن تنش شکست اعمالی از تنش شکست تئوری است؛ بنابراین تأثیر مضر وجود ترک، افزایش تنش موضعی و به وجود آمدن حالت تنش سه‌بعدی در مجاورت نوک ترک است که تحت شرایط کرنش صفحه‌ای بارگذاری شده است [۳].

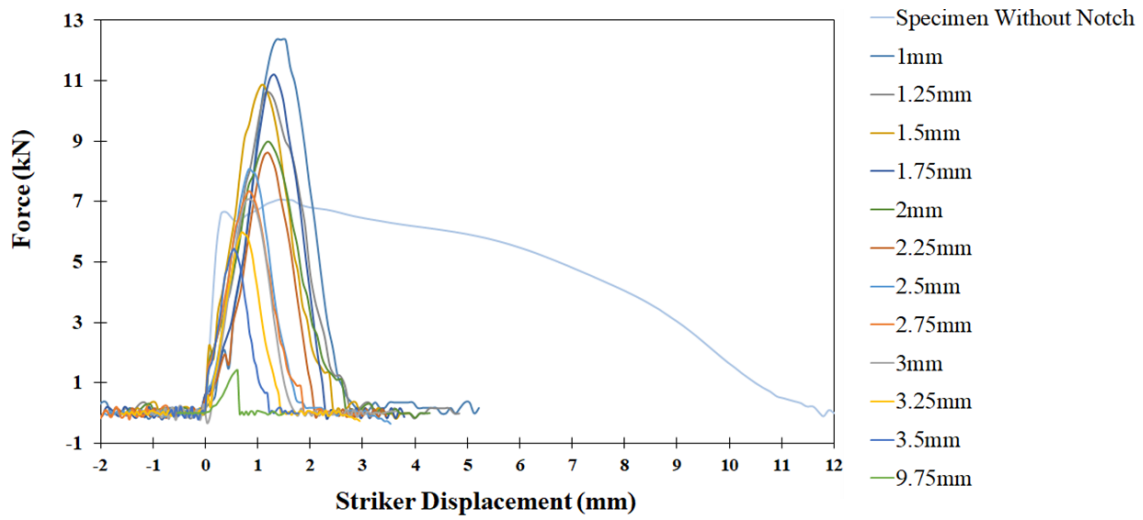
وجود شیار موجب ایجاد تراکم خطوط نیرو در نوک شیار و تمرکز تنش و افزایش مقدار آن می‌شود و در نتیجه باعث چندین برابر شدن تنش اعمالی در نوک ترک خواهد شد [۲۷].

در شکل ۲۰ نمودار بدون بعد انرژی شکست به انرژی شکست استاندارد (E/E_0) برحسب تغییرات عمق شیار نمونه به ضخامت نمونه (a/W) نشان داده شده است. در این نمودار a عمق شیار نمونه برحسب میلی‌متر و $0 \leq a \leq 10$ میلی‌متر که $0 \leq a \leq 9.75$ میلی‌متر از آزمایش تجربی انجام شده (۱۳ نمونه)، W ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و $W=10$ میلی‌متر است که محور افقی با تقسیم عمق شیار نمونه‌ها بر ضخامت نمونه به

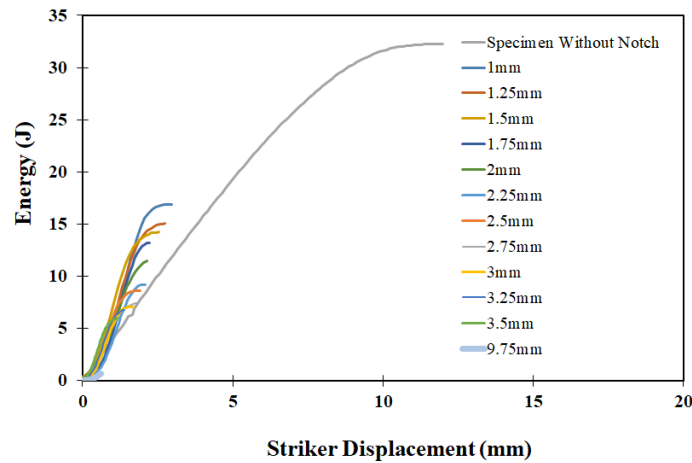
ارزیابی نمودارهای نیرو-جابجایی برای این آلومینیوم ویژگی‌های تردی را نشان می‌دهد. حداکثر نیرو به دست آمده در حدود ۱۲ کیلو نیوتن بود و به دنبال آن افت نیرو مشاهده شد که مربوط به نمونه با عمق شیار ۱ میلی‌متر (کمترین عمق شیار آزمایش شده) است. حداقل نیروی به دست آمده در حدود ۱ کیلو نیوتن است که مربوط به نمونه با عمق شیار ۹/۷۵ میلی‌متر (بیشترین عمق شیار آزمایش شده) است. کلیه نمودارها با افزایش و کاهش ناگهانی نیرو همراه هستند، ولی نمونه بدون شیار با افزایش ناگهانی نیرو و سپس کاهش آهسته نیرو است که نشان‌دهنده افزایش زمان، جابجایی و انرژی شکست است. با افزایش عمق شیار جابجایی ضربه‌زن گزارش شده توسط کرنش‌سنج‌ها کمتر شده که نشان‌دهنده کاهش انرژی شکست و تردتر شکست است.

مقدار انرژی شکست نمونه ضربه شارپی را می‌توان به صورت مستقیم از ماشین ضربه شارپی دریافت کرد و یا اینکه ابتدا نمودار نیرو-جابجایی را از ضربه‌زن مجهز شده دریافت کرد و سپس با محاسبه مساحت زیر سطح نمودار نیرو-جابجایی نمونه ضربه شارپی، مقدار انرژی برحسب ژول به دست خواهد آمد.

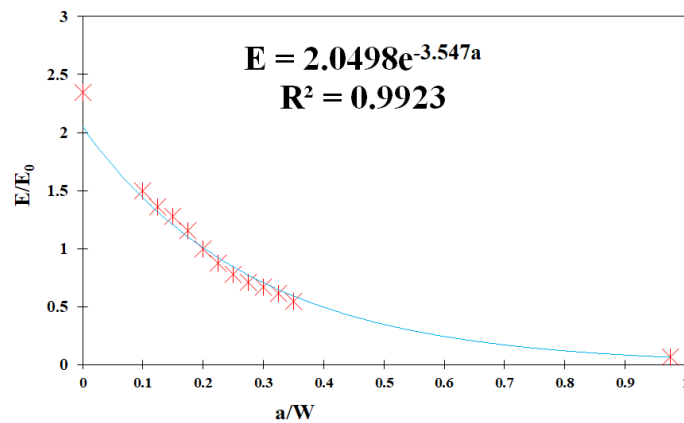
با انتگرال‌گیری مساحت زیر نمودار مورد نظر را به دست آورد که این مساحت همان انرژی شکست است. خروجی آزمایش ضربه شارپی فقط مقدار انرژی شکست برحسب ژول است. داده‌های نمودار نیرو-جابجایی آلومینیوم ۷۰۷۵ در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و شکل‌های ۲۱-۳۱ پیوست از آزمایش



شکل ۱۸- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های شاری با عمق شیار مختلف



شکل ۱۹- نمودار انرژی-جابجایی برای نمونه‌های شاری با عمق شیار مختلف



شکل ۲۰- نمودار تغییر انرژی به انرژی استاندارد بر حسب عمق شیار بر ضخامت برای آزمایش ضربه شاری

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر عمق شیار بر انرژی شکست شارپی نمونه‌هایی از آلومینیوم ۷۰۷۵-T651 به صورت تجربی بررسی شده است. در این راستا ابتدا ۳۹ نمونه در ۱۳ گروه ۳ تایی با عمق شیاریهای متفاوت برش داده شده است. در ادامه با انجام آزمایش ضربه شارپی روی نمونه‌های ساخته شده، انرژی شکست برای نمونه‌های مختلف تعیین شده است. در نهایت انرژی با ضربه‌زن مجهز به کرنش‌سنج نمودار نیرو-جابجایی برای هر عمق شیار به دست آمده است و با نتایج حاصل از دستگاه ضربه شارپی ساده اعتبارسنجی شده است. خلاصه نتایج به دست آمده عبارتند از:

۱. با افزایش عمق شیار انرژی شکست شارپی به صورت نمایی بر اساس رابطه $E=22.835e^{-0.355a}$ کاهش پیدا می‌کند. با معلوم بودن این رابطه می‌توان مقدار دقیق انرژی شکست شارپی را برای هر شیار دلخواه در آلومینیوم ۷۰۷۵ آزمایش شده محاسبه کرد.

۲. با استفاده از رابطه تجربی به دست آمده در تحقیق حاضر $(E=22.857e^{-0.355a})$ و با جایگذاری مقدار استاندارد عمق شیار (۲ میلی‌متر) مقدار انرژی شکست شارپی برابر ۱۱/۲۳ ژول به دست می‌آید که با نتایج تجربی (۱۱/۱۴ ژول) تطابق دارد. خطای حاصل از درون‌یابی رابطه تجربی برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد ۰/۸۱ درصد است.

۳. برای اعتبارسنجی نتایج آزمایش تجربی از مجهز کردن ضربه‌زن شارپی به کرنش‌سنج و گرفتن نمودارهای نیرو-جابجایی از آن، استفاده شده است. کمترین خطا برای نمونه بدون شیار با ۰/۰۹ درصد و بیشترین خطا مربوط به نمونه با شیار ۹/۷۵ میلی‌متر با ۷/۵۶ درصد بوده است. میانگین خطای ۱۳ نمونه آزمایش شده ۲/۹۸ درصد است که انطباق مناسبی با نتایج تجربی دستگاه ضربه شارپی ساده دارد.

۴. از شکست‌نگاری ماکرو نتیجه می‌شود با افزایش عمق شیار سطح شکست صاف‌تر شده و به شکست ترد میل می‌کند و همچنین لبه برشی کاهش می‌یابد.

دست می‌آید. محور عمودی از تقسیم انرژی شکست حاصل از آزمایش تجربی ضربه شارپی نمونه‌ها برحسب ژول (E) بر انرژی شکست نمونه استاندارد حاصل از آزمایش تجربی ضربه شارپی برحسب ژول ($E_0=11.14J$) به دست می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک رابطه نمایی با رگرسیون ۰/۹۹۲۳ گزارش شده است.

نتایج حاصل از انرژی شکست تجربی و انرژی شکست به دست آمده از مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی دستگاه تجهیز شده، در جدول ۳ ذکر شده و با یکدیگر مقایسه گردید. با توجه به مقادیر به دست آمده و میزان خطای کمتر از ۸ درصد می‌توان نتیجه گرفت؛ نتایج آزمایش تجربی از انطباق مناسبی با نتایج به دست آمده از مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی ضربه‌زن تجهیز شده، برخوردار است.

جدول ۳- مقایسه انرژی شکست تجربی و انرژی شکست حاصل از نمودار نیرو-جابجایی برای عمق شیارها مختلف

ردیف	عمق شیار (میلی‌متر)	انرژی شکست تجربی	انرژی شکست حاصل از نمودار نیرو-جابجایی	تفاوت درصدی
۱	۰	۳۲/۲۴	۲۳/۲۷	۰/۰۹
۲	۱	۱۶/۷۱	۱۶/۸۹	۱/۰۸
۳	۱/۲۵	۱۵/۱۶	۱۵/۰۴	۰/۷۹
۴	۱/۵	۱۴/۲۴	۱۴/۲۲	۰/۱۴
۵	۱/۷۵	۱۲/۸۵	۱۳/۲۱	۲/۸۰
۶	۲	۱۱/۱۴	۱۱/۷۸	۵/۷۵
۷	۲/۲۵	۹/۷۴	۹/۱۹	۵/۶۵
۸	۲/۵	۸/۶۵	۸/۶۳	۰/۲۳
۹	۲/۷۵	۷/۹۱	۷/۴۲	۶/۱۹
۱۰	۳	۷/۴۵	۷/۰۸	۴/۹۷
۱۱	۳/۲۵	۶/۸۷	۶/۷۵	۱/۷۵
۱۲	۳/۵	۶/۱۲	۶/۰۱	۱/۷۸
۱۳	۹/۷۵	۰/۷۹	۰/۷۳	۷/۵۶

- AA7075-T6 aluminium alloy joints. Mater Design 535-549.
- [2] Kunigita M, Aihara S, Kawabata T, Kasuya T, Okazaki Y, Inomoto M (2020) Prediction of Charpy impact toughness of steel weld heat affected zones by combined micromechanics and stochastic fracture model - Part I: model presentation. Eng Fract Mech 230(60).
- [3] Ghanei S, Saheb-Alam A, Sajjadi SA, Zabarjad S M (2010) Study of the effect of groove depth on the change in strength of simple carbon steels. The Fourth Joint Conference of the Association of Metallurgical Engineers and the Scientific Foundry Society of Iran.
- [4] Barati A, Alizadeh Y, Aghazadeh J (2009) Investigation of the change in the depth and radius of the U-shaped groove on the integral value of J. 17th Annual Conference of Mechanical Engineering, Tehran, Tehran University. (In Persian)
- [5] Lukas P, Kunz L, Weiss B, Stickler R (1989) Notch size effect in fatigue. Fatigue Fract Eng M 12(3): 175-186.
- [6] Sidener SE, Kumar AS, Oglesby DB, Schubert LE, Hamilton ML, Rosinski ST (1996) Dynamic finite element modeling of the effects of size on the upper shelf energy of pressure vessel steels. J Nucl Mater 239: 210-218.
- [7] Barati E, Alizadeh Y, Aghazadeh J (2009) The effect of notch depth and notch root radius on the averaged strain energy density and on fracture load in U notches under bending. Appl Mech J 5(2): 39-49. (In Persian)
- [8] Nazari A, Aghazadeh-Mohandesi J, Vishkasogheh M H, Abedi M (2011) Simulation of impact energy in functionally graded steels. Nato Sc S Ss Iii C S 50(3): 1187-1196.
- [9] Salavati H, Alizadeh Y, Berto F (2014) Effect of notch depth and radius on the critical fracture load of bainitic functionally graded steels under mixed mode I + II loading. Phys Mesomech 17(4): 29-39.
- [10] Cova M, Nanni M, Tovo R (2014) Geometrical size effect in high cycle fatigue strength of heavywalled ductile cast iron GJS400: weakest link vs defect-based approach. Procedia Eng 74: 101-104.
- [11] You M, Li M, Li JL, Liu K, Zhao YL (2014) Effect of notch depth on the adhesively bonded steel butt-joint under Charpy impact test. Appl Mech Mater 488-489: 538-541.
- [12] Hosseinzadeh A, Hashemi SH (2018) Experimental investigation of notch depth effect on charpy fracture energy in API X65 steel. ISME 2018. (In persian)

۵. انتشار ترک برای نمونه‌های دارای شیار با نیروی ضربه نرمال تراز شده است، ولی برای نمونه بدون شیار، انتشار ترک یک الگوی زیگزاگ را توصیف می‌کند. در هر دو مورد، این خصوصیات به مورفولوژی ساختار دانه نسبت داده شده است.

۶. شکست‌نگاری میکرو نشان داده است که مکانیسم‌های مختلف شکست با تغییر عمق شیار نمونه‌ها از جمله شکست نرم-ترد، شکست شبه ترد و شکست ترد اتفاق افتاده است. با افزایش عمق شیار شکست تردتر می‌شود.

۷. با توجه به تصاویر SEM مشاهده شده است که در عمق شکست پایین میکرو دیپل‌ها و حفرات بسیار وجود دارند و شکل ظاهری به صورت ناهموار و حفره فنجان‌ی است و در عمق شکست بالاتر ظاهر سطوح به صورت صاف و یکنواخت است.

۸. با افزایش عمق شیار منطقه مومسانی جلو ترک که به بسته شدن ترک کمک می‌کند و همچنین واکنش و برخورد میکرو دوقلویی‌ها که به شکست نرم کمک می‌کنند، کمتر می‌شود.

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه صنعتی قوچان به دلیل انجام برخی آزمایش‌های ضربه شاریبی کمال تقدیر و تشکر را دارند؛ همچنین نویسندگان از دکتر دانیال قهرمانی مقدم (استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان) برای انجام آزمون در آزمایشگاه کنترل کیفیت دانشگاه صنعتی قوچان، همچنین نویسندگان از مهندس محمدرضا موحدی، مهندس محمدعلی آبادزردشتی، مهندس محمدعلی خدادادی، مهندس مجتبی هادی‌پور و مهندس مرتضی طاهری که در انجام این تحقیق کمک کرده‌اند کمال تقدیر و تشکر را دارند؛ همچنین نویسندگان از آقای داود خادمی مسئول آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد که در تهیه عکس‌های SEM بسیار کمک کردند، کمال تقدیر و تشکر را دارند.

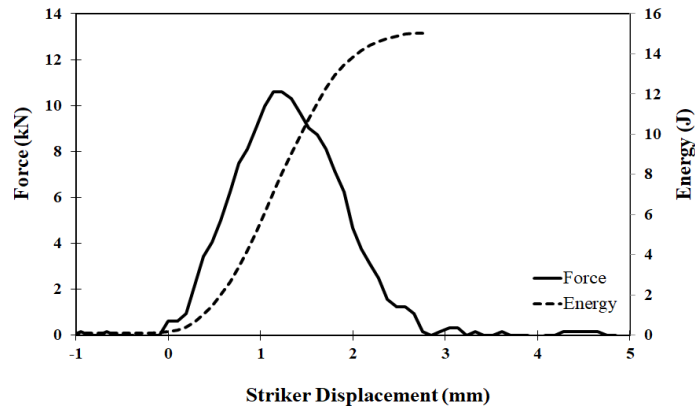
۹- مراجع

- [1] Rajakumar S, Muralidharan C, Balasubramanian V (2011) Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of

- [21] Lotfi A, Nourouzi S (2014) The microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy by the use of Design of Experiment. *Modares Mechanical Engineering* 14(3): 17-26.
- [22] Majidi A, Hashemi SH (2018) Study of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering* 17(11): 219-228.
- [23] Hosseinzadeh A, Maraki MR, Sadidi M (2020) Investigation of the effect of notch tip radius on fracture energy of Charpy in 7075 aluminum alloy. *J Adv Des Manuf Tech* 13(2): 65-72.
- [24] Sahraoui S, Lataillade JL (1998) Analysis of load oscillations in instrumented impact testing. *Eng Fract Mech* 60(4): 437-446.
- [25] Server WL, Wullaert RA, Shekherd JW (1977) Evaluation of current procedures for dynamic fracture-toughness testing. *Am Soc Test Mater* 631: 446-461.
- [26] Spiegel R, Schiller J, Al- Srinivasan R (2009) *Problability and statistics*. The McGraw-Hill.
- [27] Meyers MA, Chawla KK (1999) *Mechanical behavior of materials*. Prentice Hall, New Jersey.
- [28] Talafi-noghani M, Shaeri M. H, Esmaili A, Razaghian-arani A (2018) Effect of severe plastic deformation by equal channel angular pressing on fracture toughness of Al-7075 alloy. *Modares Mechanical Engineering* 17(12): 11-20.
- [29] Kumar PV, Reddy GM, Rao KS (2015) Microstructure, mechanical and corrosion behavior of high strength AA7075 aluminium alloy friction stir welds—Effect of post weld heat treatment. *Defenc Tech* 11(4): 362-369.
- [13] Luzio GD, Cusatis G (2018) Cohesive crack analysis of size effect for samples with blunt notches and generalized size effect curve for quasi-brittle materials. *Eng Fract Mech* 204: 15-28.
- [14] Emamverdi A, Maraki MR, Sadidi M, Hosseinzadeh A (2019) Experimental investigation of notch tip radius effect on charpy fracture energy in aluminum 7075. *ISME2019*. (In Persian)
- [15] Maraki MR, Sadidi M, Emamverdi A, Hosseinzadeh A (2019) Experimental investigation of notch angle effect on charpy fracture energy in aluminum 7075. *ISME2019*. (In Persian)
- [16] Hosseinzadeh A, Maraki MR, Emamverdi A, Sadidi M (2019) Experimental investigation of notch depth effect on charpy fracture energy in aluminum 7075. *ISME2019*. (In Persian)
- [17] Maraki M, Movahedi M, Hosseinzadeh A, Farhangdoost K (2019) Investigation of rousselier model and gurson-tvergaard-needleman model in ductile fracture of API X65 gas pipeline steel. *J Appl Comput Mech* 7:1.
- [18] Hosseinzadeh A, Hashemi SH (2020) Experimental and numerical investigation of notch depth effect on charpy fracture energy in API X65 steel. *Iran J Mech Eng*. (In Persian)
- [19] Ambriz RR, Jaramillo D, Garcia C, Curiel FF (2016) Fracture energy evaluation on 7075-T651 aluminum alloy welds determined by instrumented impact pendulum. *Trans Nonferrous Met Soc China* 26: 974-983.
- [20] Hosseinzadeh A, Farhangdoost Kh, Maraki MR (2020) Effect of V-notch depth on fracture toughness and the plastic region of the crack tip using charpy impact test data in API X65 steel. *J App Comp Sci Mechs* (Ferdowsi University of Mashhad).

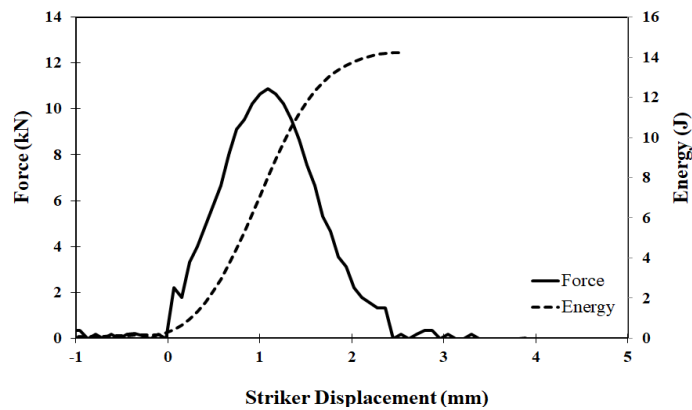
۸- پیوست

Notch Depth: 1.25mm



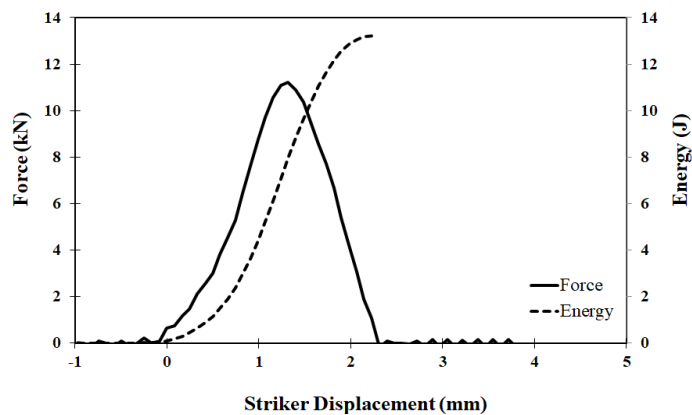
شکل ۲۱- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به دست آمده از کرنش سنج‌های چکش برای عمق شیار ۱/۲۵ میلی‌متر

Notch Depth: 1.5mm



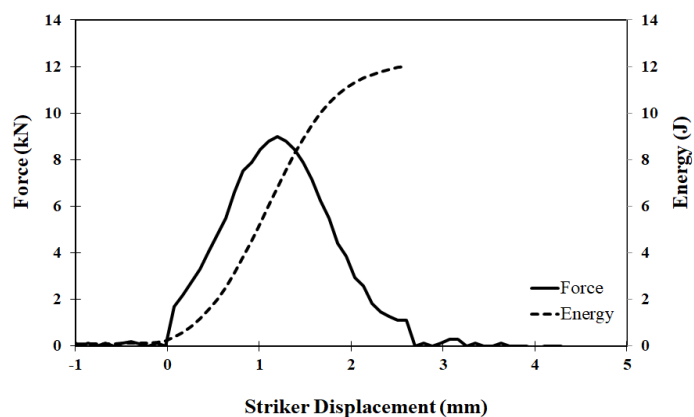
شکل ۲۲- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به دست آمده از کرنش سنج‌های چکش برای عمق شیار ۱/۵ میلی‌متر

Notch Depth: 1.75mm



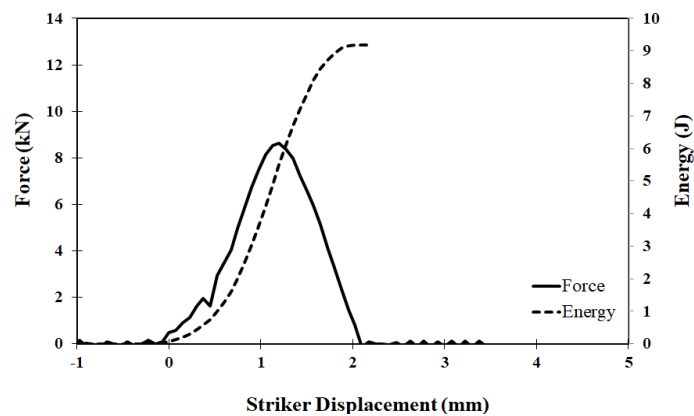
شکل ۲۳- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به دست آمده از کرنش سنج‌های چکش برای عمق شیار ۱/۷۵ میلی‌متر

Notch Depth: 2mm



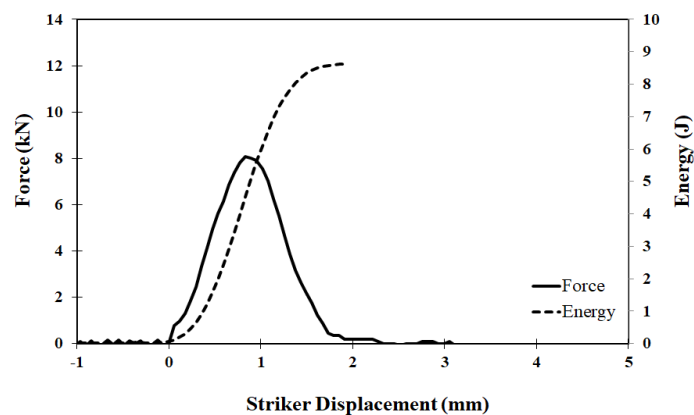
شکل ۲۴- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به‌دست‌آمده از کرنش‌سنج‌های چکش برای عمق شیار ۲ میلی‌متر

Notch Depth: 2.25mm



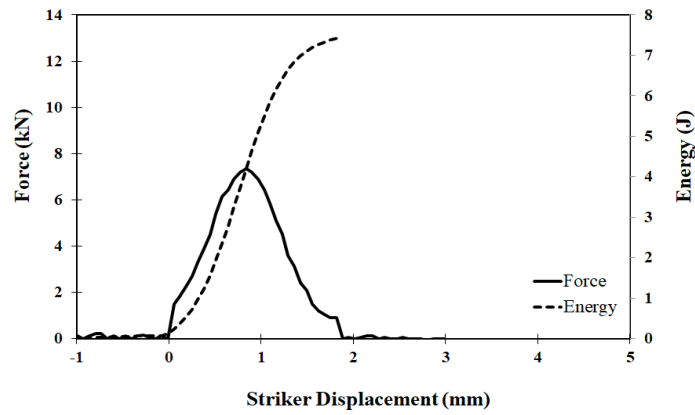
شکل ۲۵- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به‌دست‌آمده از کرنش‌سنج‌های چکش برای عمق شیار ۲/۲۵ میلی‌متر

Notch Depth: 2.5mm



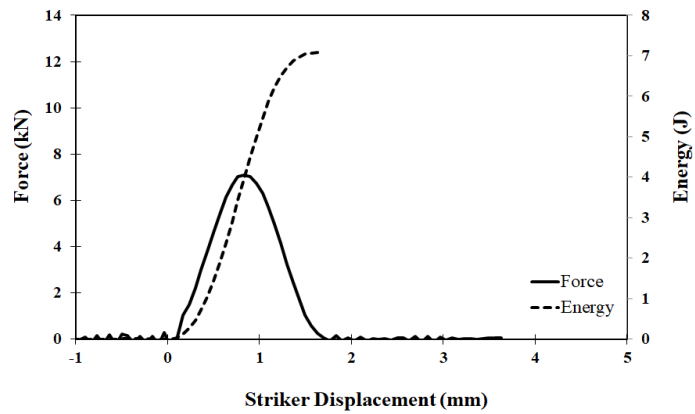
شکل ۲۶- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به‌دست‌آمده از کرنش‌سنج‌های چکش برای عمق شیار ۲/۵ میلی‌متر

Notch Depth: 2.75mm



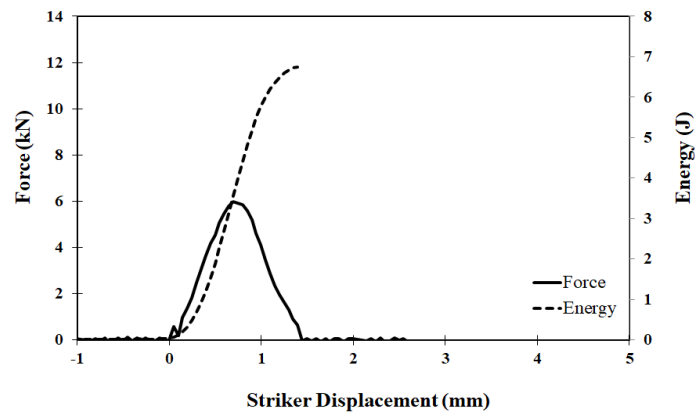
شکل ۲۷- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به دست آمده از کرنش سنج‌های چکش برای عمق شیار ۲/۷۵ میلی‌متر

Notch Depth: 3mm



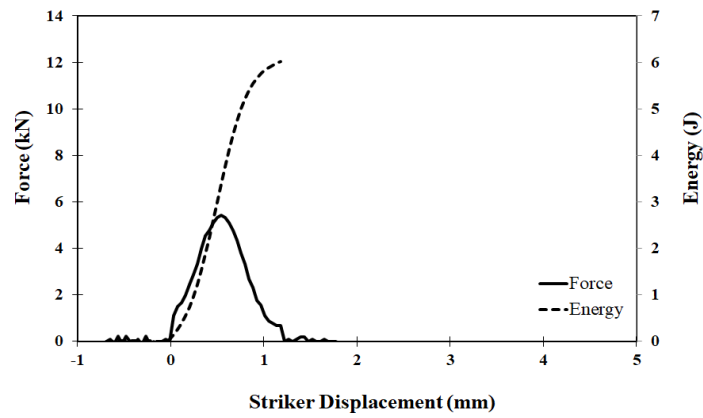
شکل ۲۸- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به دست آمده از کرنش سنج‌های چکش برای عمق شیار ۳ میلی‌متر

Notch Depth: 3.25mm



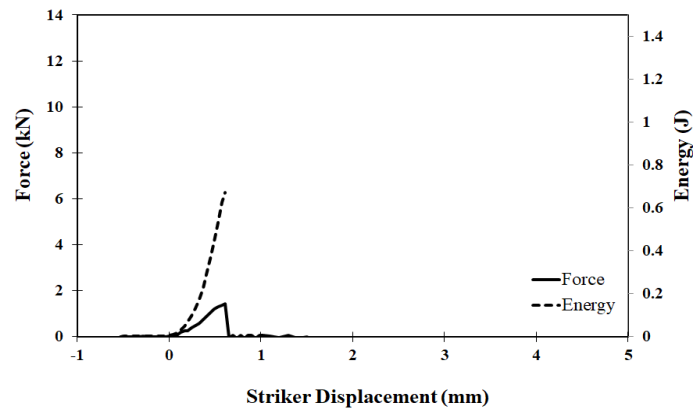
شکل ۲۹- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به دست آمده از کرنش سنج‌های چکش برای عمق شیار ۳/۲۵ میلی‌متر

Notch Depth: 3.5mm



شکل ۳۰- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به‌دست‌آمده از کرنش‌سنج‌های چکش برای عمق شیار ۳/۵ میلی‌متر

Notch Depth: 9.75mm



شکل ۳۱- نمودارهای نیرو، انرژی-جابجایی به‌دست‌آمده از کرنش‌سنج‌های چکش برای عمق شیار ۹/۷۵ میلی‌متر