

بررسی رفتار شکست و مکانیزم چقرمگی ورق ST44 با استفاده از روش کار ضروری شکست

میثم نوری نیارکی^{۱*}، محمد نجاتی^۲

۱- استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
۲- دکتری، گروه مکانیک جامدات، دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷)

چکیده

در این تحقیق، به بررسی رفتار شکست و مکانیزم چقرمگی ورق ST44 در حالت تنش صفحه‌ای با استفاده از روش کار ضروری شکست پرداخته شده است. در این تحقیق از ورق فولاد ST44 برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. برای دستیابی به خواص مکانیکی الاستیک-پلاستیک ورق ST44، از نمونه‌های دنبلی شکل تست کشش استفاده گردید. سپس نمونه‌های کششی با دو شیار لبه‌ای عمیق (DENT)، برای انجام آزمون کار ضروری شکست ساخته شدند. نمونه‌های مورد نیاز در ابعاد $180 \times 60 \times 2$ میلی‌متر توسط لیزر برش داده شدند. در قسمت میانی هر نمونه دو شیار به طول ۹ تا ۱۹ میلی‌متر ایجاد شد که فاصله نوک این دو شیار از یکدیگر طول لیگامنت را ایجاد کردند. پس از انجام آزمون کشش بر روی نمونه‌ها، مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه به دست آمده و به کمک رگرسیون، خطی از نقاط بدست آمده رسم گردید. عرض از مبدأ معادله خط بدست آمده، کار ضروری ویژه‌ی شکست بوده و برابر 554.92 kJ/m^2 می‌باشد. به منظور محاسبه بازشدگی بحرانی نوک ترک و زاویه بحرانی بازشدگی نوک ترک، نمودار ماکزیمم جابجایی بدست آمده از نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه رسم گردید. از نمودار نیرو-جابجایی رسم شده، بازشدگی بحرانی نوک ترک برای ورق ST44 برابر با $\delta c = 2.5285 \text{ mm}$ و زاویه بحرانی بازشدگی نوک ترک برابر با $\Psi c = 0.33 \text{ rad}$ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: کار ضروری شکست، فولاد ST44، مکانیزم چقرمگی، بازشدگی بحرانی نوک ترک، زاویه بحرانی بازشدگی نوک ترک

Investigating the fracture behavior and toughness mechanism of ST44 sheet using the essential work of fracture method

Meysam Nouri Niyaraki, Mohammad Nejati

Abstract

In this research, the failure behavior and toughness mechanism of ST44 sheet in the plane stress state have been investigated using the essential work of fracture method. In this research, ST44 steel sheet was used to make samples. To obtain the elastic-plastic mechanical properties of ST44 sheet, tail-shaped specimens were used for tensile testing. Then tensile samples with two deep edge grooves (DENT) were made to perform the essential work of fracture test. The samples were cut by laser in dimensions of $180 \times 60 \times 2 \text{ mm}$. In the middle part of each sample, two notches with a length of 9 to 19 mm were created, and the distance between the tips of these two notches was the length of the ligament. After performing the tensile test on the samples, the area under the force-displacement graph was obtained for each sample and with the help of regression, a line was drawn from the obtained points. The width obtained from the origin of the equation of the line is the specific essential work of fracture and is equal to 554.92 kJ/m^2 . In order to calculate the critical opening of the crack tip and the critical opening angle of the crack tip, the maximum displacement diagram obtained from the force-displacement plot was drawn. From the drawn plot, the critical opening of the crack tip for ST44 sheet is equal to $\delta c = 2.5285 \text{ mm}$ and the critical opening angle of the crack tip is equal to $\Psi c = 0.33 \text{ rad}$.

Key words: Essential work of fracture (EWF), ST44 steel, Toughness mechanism, Critical opening of the crack tip, Critical crack tip opening angle

مقدمه

در سال‌های اخیر به منظور جلوگیری از شکست سازه‌ها و قطعات، مهندسیین و طراحان از اصول مکانیک شکست استفاده‌های فراوانی کرده‌اند. به‌گونه‌ای که بیشتر از ۸۰ درصد طراحی‌هایی که امروزه انجام می‌شوند یا از این اصول پیروی می‌کنند یا توسط این اصول مورد آزمایش قرار می‌گیرند. بسیاری از مواد و سازه‌ها در هنگام تولید شدن، برای مثال در عملیات جوشکاری و یا ماشین‌کاری دچار ترک یا ناپیوستگی در روی سطح یا داخل خود می‌گردند که این ترک‌ها کم‌کم رشد نموده و باعث از هم گسیختن سازه‌ها شده که منجر به از کار افتادن سازه‌ها در بلند مدت می‌شود. به همین منظور حساب کردن مقدار حساسیت هر سازه و یا هر قطعه هدف اصلی مکانیک شکست می‌باشد.

با اینکه در دنیای امروز سازه‌هایی که بر اثر شکست به صورت ترد از کار می‌افتادند بسیار کم می‌باشد ولی باز هم سازه‌هایی وجود دارد که به صورت ترد شکسته شده و از کار می‌افتند. شکست در سازه‌ها از سالیان دور مرسوم بوده و امروزه نیز ادامه‌دار می‌باشد. به عنوان مثال محققانی همچون شنگ [۱] و همچنین بارکر [۲] به بررسی سازه‌هایی که به صورت ترد شکسته‌اند و همچنین سازه‌هایی که به صورت ناگهانی در آنها ترک رخ داده و می‌شکنند پرداخته‌اند. عوامل گوناگونی بر بروز پدیده شکست در سازه‌ها نقش دارند که از آن جمله می‌توان خواص و استحکام ماده در مقابل شکست، درجه حرارت، شرایط محیطی (خصوصاً میزان خوردنده بودن محیط)، جوشکاری، تنش‌های پسماند، نوع و مقدار بارگذاری (از نظر بار استاتیکی متناوب، متناوب و یا ضربه‌ای) و کیفیت تولید را نام برد [۳].

کار ضروری شکست (EWF) یکی از روش‌هایی است که به‌طور گسترده برای ارزیابی چقرمگی شکست مواد نرم در شرایط تنش صفحه‌ای استفاده می‌شود. این روش در ابتدا برای شکست نرم فلزات در حالت تنش صفحه‌ای پیشنهاد شد [۴] و سپس برای مواد دیگر همچون پلیمرها نیز بکار گرفته شد [۵]. روش EWF در مقایسه با روش انتگرال J مزایای زیادی مثل آسان بودن روش آزمون و قابلیت کاربرد برای نمونه‌های نازک‌تر را فراهم می‌کند. همچنین پارامترهای EWF تنها مربوط به شروع گسترش ترک نیستند، بلکه سهم رشد پایدار ترک را نیز در نظر می‌گیرند [۶].

با توجه به تعداد رو به گسترش انتشارات مربوط به روش کار ضروری شکست مشخص می‌شود که این روش اهمیت قابل‌ملاحظه‌ای یافته و به شدت مورد توجه قرار گرفته است. از زمان انتشار کارهای اولیه در ارتباط با روش کار ضروری شکست [۷ و ۸] این روش با موفقیت به ورق‌های نازک فلزی نرم اعمال شد [۹-۱۳]. بر اساس این روش منطقه مومسان نوک ترک به دو جزء تقسیم می‌شود [۱۴]:

۱- منطقه داخلی که فرایند شکست در آن اتفاق می‌افتد.

۲- منطقه خارجی که تغییر شکل مومسان به‌صورت گسترده در آن ظاهر می‌شود.

کار مورد نیاز برای شکست یک نمونه داری ترک نیز به دو دسته تقسیم می‌شود.

اول: کاری که برای شکست در منطقه فرآیند مورد نیاز است و بنابراین سطوح جدیدی ایجاد می‌کند (کار ضروری شکست). کار ضروری شکست به ازای ضخامت معین، ثابت و مستقل از هندسه نمونه است که به عنوان چقرمگی شکست در نظر گرفته می‌شود و مقاومت به ترک ماده را منعکس می‌کنند [۱۵]. این مطلب به صورت تجربی توسط نویسندگان مختلف تأیید شده است [۱۶-۱۸].

دوم: کاری که در منطقه مومسان خارجی، جایکه مکانیزم‌های مختلف تغییر شکل مومسان اتفاق می‌افتد، مصرف می‌شود (کار غیر ضروری شکست). کار غیر ضروری وابسته به شکل منطقه مومسان اطراف ترک است و با کار مصرف شده برای تغییر شکل مومسان در واحد حجم ماده متناسب است. خدابندلو و همکارانش [۱۹] به مطالعه رفتار شکست و مکانیزم چقرمگی پلی‌پروپیلن اصلاح شده با مستریج بهبود دهنده مقاومت ضربه‌ای پرداختند. آنها در این تحقیق خود از آزمون‌های ضربه و آزمون کار ضرورت شکست استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزودن مستریج بهبود دهنده مقاومت ضربه‌ای موجب افزایش کار ضروری شکست و همچنین افزایش استحکام ضربه شده است. همچنین آنها با توجه به تصاویر میکروسکوپی گرفته شده گزارش کردند که مهم‌ترین مکانیزم شکست در آزمون ضربه، افزایش حفره و ترک و انحراف مسیر رشد ترک بوده و مهم‌ترین مکانیزم شکست آزمون توسعه مکانیزم تسلیم برشی و تبدیل تنش‌های دو بعدی به سه بعدی می‌باشد.

به بررسی تأثیر پارامترهای هندسه نمونه، نرخ کرنش و جهت قرار گرفتن ورقه پلیمری مورد استفاده بر روی کار شکست ضروری و غیرضروری را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که جهت قرارگیری ورق و همچنین ضخامت ورق در کار ضروری شکست تأثیر دارد. همچنین آنها اعلام کردند که با افزایش مقدار لیگامنت در نمونه‌ها، کار ضروری شکست کاهش می‌یابد.

شیرمحمدی و همکارانش [۲۴] به بررسی چقرمگی شکست نانوکامپوزیت‌های سلولز پلیمری با استفاده از روش کار ضروری شکست پرداختند. آنها نمونه‌های DENT خود را با نانوکامپوزت‌های مربوطه ساختند. آنها نمونه‌ها را تحت بارگذاری کششی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش ضخامت نمونه‌ها باعث کاهش کار ضروری شکست شده و افزایش میزان لیگامنت نیز باعث کاهش کار ضروری شکست شده است.

در این تحقیق، به بررسی رفتار شکست و مکانیزم چقرمگی ورق ST44 در حالت تنش صفحه‌ای با استفاده از روش کار ضروری شکست پرداخته شده است. به همین منظور از ورق فولاد ST44 برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. برای دستیابی به خواص مکانیکی الاستیک-پلاستیک ورق ST44، از نمونه‌های دنبلی شکل تست کشش استفاده گردید. سپس نمونه‌های کششی با دو شیار لبه‌ای عمیق (DENT)، برای انجام آزمون کار ضروری شکست ساخته شدند و به منظور محاسبه بازشدگی بحرانی نوک ترک و زاویه بحرانی بازشدگی نوک ترک، نمودار ماکزیمم جابجایی بدست آمده از نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه رسم گردید.

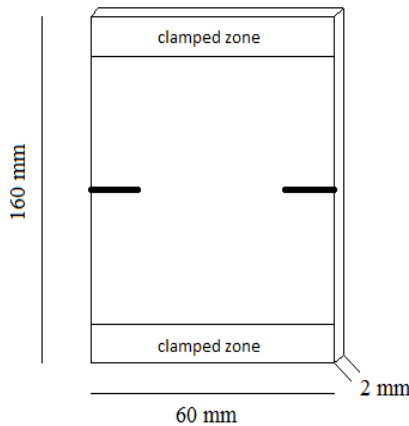
مواد مورد استفاده

در این تحقیق از ورق فولاد ST44 برای ساخت نمونه‌ها استفاده گردید. فولاد ST44 به دلیل داشتن درصد کم کربن، از جمله فولادهای نرم به حساب می‌آید. این آلیاژ به دلیل خواص مکانیکی برجسته‌ای مانند استحکام تسلیم بالا، مقاومت به خستگی و چقرمگی، به طور گسترده در صنایع هوافضا به کار می‌رود. از جمله کاربردهای مهم این آلیاژ می‌توان به استفاده از آن در ساخت اجزای بحرانی لندیگ مانند ارایه فرود، اجزای موتورهای موشک و سازه‌های اصلی فضاپیما اشاره کرد. این آلیاژ قادر است تنش‌های ناشی از بارگذاری‌های

حدادی و همکارانش [۲۰]، به بررسی تجربی و عددی چقرمگی شکست مود دو پلیمر پلی متیل کریلات چقرمه شده با لاستیک با استفاده از آزمون کار ضروری شکست پرداختند. آنها آزمایشات خود را بر روی نمونه کششی دارای ترک در دو لبه پلیمر پلی متیل متاکریلات چقرمه شده با لاستیک در دمای اتاق انجام دادند. آنها درصد وزنی لاستیک صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی و ضخامت نمونه‌ها ۰/۸ و ۴ میلی‌متر در نظر گرفتند. آنها به این نتیجه رسیدند که هر مقدار که طول لیگامنت کمتر باشد، مقادیر بدست آمده برای کار ضروری شکست از دقت بالاتری برخوردار است که علت آن را تسلیم کامل لیگامنت دانستند. همچنین آنها گزارش کردند که منحنی نیرو جابجایی حاصل از نمونه‌ها با درصدهای مختلفی از لاستیک و طول لیگامنت‌های مختلف از نظر شکل ظاهری با هم تقریباً یسان بوده و کار ویژه کلی شکست با افزایش درصد لاستیک، افزایش قابل توجهی داشته است. آنها گزارش کردند که کار ضروری و کار غیرضروری شکست در هر دو ضخامت با افزایش درصد لاستیک افزایش یافته است.

مارتینز و همکارانش [۲۱] به تجزیه و تحلیل مکانیک شکست پس از تسلیم پلیمرها با روش کار ضروری شکست پرداختند. آنها گزارش کردند که روش کار ضروری شکست روشی مناسب برای ارزیابی پارامترهای مختلف بر روی شکست ورقه‌های نازک می‌باشد. کومار و همکارانش [۲۲] به تحلیل چقرمگی شکست فولاد دوفازی مورد استفاده در صنایع خودروسازی به روش کار ضروری شکست پرداختند. آنها تحقیق خود فولاد DP450 را مورد بررسی قرار دادند. آنها نمونه‌هایی با ناچ در دو لبه (DENT) را به دو صورت با پیش ترک خستگی و بدون ترک خستگی آماده کردند. آنها از تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای از پارامترهای کار ضروری شکست استفاده کردند. آنها پارامترهای جابجایی نوک ترک و زاویه باز شدن نوک ترک را انتخاب کردند. آنها برای برش نمونه‌ها از برش پرتو لیزر استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش لیگامنت نمونه‌ها باعث افزایش کار ضروری شکست در نمونه‌ها گردیده است.

لی و همکارانش [۲۳] به بررسی چقرمگی شکست پلی اتیلن با چگالی کم از طریق روش کار ضروری شکست پرداختند. آنها در آزمایشات خود از نمونه‌های بریده شده دو لبه‌ای استفاده کردند و نمونه‌های خود را مورد آزمایش کشش قرار دادند. آنها



شکل ۲- شماتیک نمونه‌های فولاد ST44 با ناچ لبه‌ای

تجهیزات

در این تحقیق برای برش نمونه‌های دمبلی شکل آزمون تست کشش و همچنین برش نمونه‌های آزمون کار ضروری شکست از دستگاه برش لیزر مدل فایبر استفاده شد. همچنین برای ایجاد شیار در دو لبه نمونه‌های آزمون کار ضروری شکست از دستگاه وایرکات مدل BMXP استفاده گردید. برای انجام آزمون‌های کشش و بدست آوردن خواص مکانیکی نمونه‌ها و همچنین آزمون کار ضروری شکست از دستگاه تست کشش به نام SANTAM موجود در آزمایشگاه متالوگرافی جهاد دانشگاه صنعتی شریف استفاده شد. این دستگاه قابلیت انجام تست‌های کشش و فشار تا ۵ تن را دارد. این دستگاه به کامپیوتری وصل شده که از طریق آن اطلاعات بدست آمده از هر تست کشش یا فشار را به از طریق این کامپیوتر تجزیه و تحلیل کرده و ذخیره می‌کند که کاربر بتواند از آنها استفاده نماید. این دستگاه دارای دو گیره یا فک در بالا و پایین می‌باشد که دو سر قطعه توسط این دو فک گرفته شده و آزمایش کشش یا فشار بر روی آن انجام می‌گردد و نمونه تا لحظه شکستن کشیده یا فشرده شده و نتایج حاصل از آزمایش‌ها که به صورت نمودار تنش کرنش ماده بوده نمایش داده می‌شود. همچنین اطلاعات دیگری همچون تنش تسلیم، ازدیاد طول تا شکست قطعه، مدول الاستیک و خواص مکانیکی دیگر که مربوط به تست کشش یا فشار می‌باشد را نیز گزارش می‌کند.

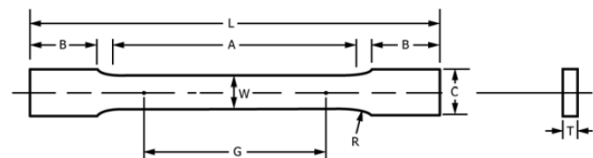
در این تحقیق به منظور مشاهده شیار ایجاد شده در نمونه‌های آزمون کار ضروری شکست از میکروسکوپ نوری

دینامیکی و حرارتی شدید در محیط‌های فضایی را تحمل کند. همچنین این فولاد در ساخت مخازن سوخت و مخازن هیدرولیک در صنایع هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد تعیین شده به روش کوانتومتری را نشان می‌دهد. در این تحقیق در ابتدا برای بدست آوردن خواص مکانیکی الاستیک - پلاستیک فولاد استفاده شده، نمونه‌های دنبلی شکل تست کشش طبق استاندارد ASTM E8 استفاده شد. شماتیک نمونه‌های دنبلی شکل که توسط دستگاه برش لیزر بریده شدند در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۵]. برای صحت نتایج ذکر شده آزمایش با سه نمونه مشابه تکرار گردید.

بر اساس استانداردها نمونه‌های کششی با دو شیار لبه‌ای عمیق (DENT) مناسب‌ترین هندسه برای روش کار ضروری شکست می‌باشد [۲۶]. جهت انجام آزمایش نمونه‌هایی به ابعاد $180 \times 60 \times 2$ mm توسط لیزر برش داده شده است. لبه‌های هر ورق توسط وایرکات با طول مشخص ناچ ایجاد شده است. فاصله‌ی بین ناچ‌ها در دو لبه‌ی هر ورق را لیگامنت (L_0) نامگذاری شدند. طول لیگامنت برای هر نمونه با نمونه‌ی بعدی متفاوت است. طول لیگامنت به ترتیب از ۱۷mm، ۱۹mm، ۱۵mm، ۱۳mm، ۱۱mm و ۹mm برای نمونه‌های ۱ تا ۶ ایجاد شده است. در شکل ۲ شماتیک نمونه‌های ورق از جنس فولاد ST44 با ناچ لبه‌ای نشان داده شده است.

جدول ۱ - ترکیبات شیمیایی فولاد ST44

عنصر	کربن	مس	فسفر	گوگرد	نیترژن	منگنز
درصد وزنی	۰/۲۱	۰/۵۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱۲	۱/۵



Dimensions	
Standard Specimens	
Sheet-Type, 12.5 mm Wide	
mm [in.]	
G—Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
W—Width	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
T—Thickness	thickness of material
R—Radius of fillet, min	12.5 [0.500]
L—Overall length, min	200 [8]
A—Length of reduced parallel section, min	57 [2.25]
B—Length of grip section, min	50 [2]
C—Width of grip section, approximate	20 [0.750]

شکل ۱- شماتیک نمونه دنبلی شکل از ورق ST44

در شرایط تنش صفحه‌ای اتفاق بیفتد [۲۷]. یکی دیگر از شرایط مورد نیاز برای اعتبار نتایج آزمون، تسلیم کامل لیگامنت قبل از شروع رشد ترک است. معمولاً تسلیم کامل منطقه لیگامنت با افت ناگهانی نیرو در منحنی نیرو-جابجایی مشخص می‌شود [۲۸]. برای حفظ حالت تنش صفحه‌ای و تسلیم کامل لیگامنت قبل از شروع رشد ترک محدودیت‌هایی روی طول لیگامنت اعمال می‌شود [۲۷].

نتایج و بحث

آزمون کشش جهت بدست آوردن نمودار تنش- کرنش فولاد ST44

در شکل ۳ نمونه‌های دمبلی از ورق تخت از جنس فولاد ST44 به ضخامت ۲ میلی‌متر نشان داده شده است که جهت تهیه‌ی آنها از برش لیزر استفاده شده است. ابعاد نمونه‌ی دمبلی طبق استاندارد ASTM E8 [۲۹] جهت تعیین خواص الاستیک-پلاستیک ورق ST44 بریده شده است. طبق این استاندارد برای صحت نتایج ذکر شده است که برای تعیین خواص حداقل سه نمونه تهیه شده و سه بار آزمون تکرار شود. برای تعیین نمودار تنش-کرنش ورق از دستگاه تست کشش SANTAM استفاده شده است. شکل ۴ نمونه‌ی دمبلی بعد از آزمون کشش و شکست آن را نشان می‌دهد. پس از انجام تست کشش نمونه‌های دمبلی، نمودار تنش-کرنش ورق ST44 به صورت شکل ۵ بدست آورده شد. طبق این نمودار خواص مکانیکی ورق ST44 به صورت جدول ۲ استخراج گردید.



شکل ۳- نمونه تست کشش از ورق ST44



شکل ۴- شکست نمونه‌ی دمبلی بعد از تست کشش

مدل NEOPOT-32 ساخت کشور آلمان شرقی و موجود در آزمایشگاه متالوگرافی جهاد دانشگاه صنعتی شریف استفاده شد.

روش‌ها

در این تحقیق از روش کار ضروری شکست برای بررسی مکانیزم شکست ورق ST44 در حالت تنش صفحه‌ای استفاده شده است. کار ضروری شکست در واحد سطح، می‌تواند با استفاده از نمونه‌های کششی با دو شیار لبه‌ای (DENT) و یا نمونه‌ی با یک شیار لبه‌ای (SENT) تعیین شود.

به منظور تعیین کار ضروری، شکست نمونه‌های با طول لیگامنت (L) مختلف تحت کشش قرار می‌گیرند. تغییرات نیرو بر جابجایی و بنابراین انرژی تا لحظه شکست (سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی) تعیین می‌شود. یکی از شروط اساسی در این آزمایش، تسلیم کامل لیگامنت قبل از شروع رشد ترک است. در این حالت، تقسیم کار شکست به یک جزء که در طول مسیر رشد ترک اتفاق می‌افتد (W_e) و جزء دیگر که در حجمی از ماده اطراف ترک اتفاق می‌افتد (W_p)، ممکن می‌شود. جزء اول متناسب با سطح شکست و بنابراین مناسب با طول لیگامنت است، در حالیکه جزء دوم متناسب با حجم منطقه بیرونی است. برای فلزات و پلاستیک‌ها مشاهده شده که حجم منطقه بیرونی با مربع طول لیگامنت متناسب است. بنابراین کل انرژی جذب شده در شکست نمونه، از طریق معادله (۱) قابل محاسبه است [۲۴]:

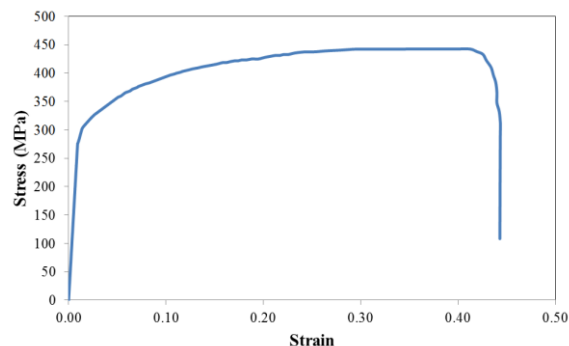
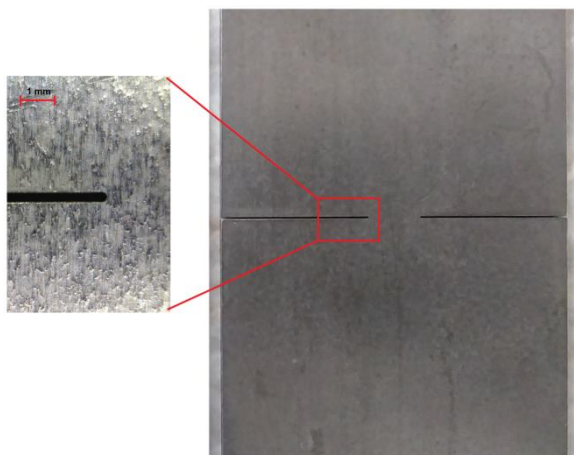
$$W_f = W_e l t + W_p \beta l^2 t \quad (1)$$

که در آن L طول لیگامنت، t ضخامت ورق و β فاکتور شکل وابسته به پهنای عمود بر خط ترک منطقه مومسان می‌باشد. با تقسیم عبارت بر Lt داریم:

$$\frac{W_f}{l t} = W_e + W_p \beta l \quad (2)$$

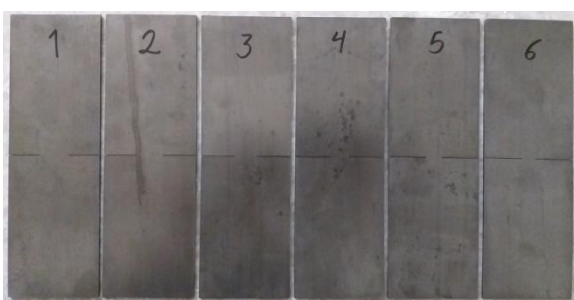
بنابراین یک رابطه خطی بین کل کار شکست در واحد سطح (W_f) و طول لیگامنت (L) حاصل می‌شود و کار ضروری شکست (W_e) بدست می‌آید.

به طور معمول کار ضروری شکست در حالت تنش صفحه‌ای تعیین می‌شود. بنابراین حالت تنش در لیگامنت هر نمونه آزمایش باید تنش صفحه‌ای باشد و شکست نمونه‌ها باید



شکل ۵- نمودار تنش- کرنش ورق ST44 به ضخامت ۲ میلی‌متر

شکل ۶- نمایی از نوک ناچ در ورق با ناچ لبه‌ای



شکل ۷- نمونه‌های ورق ST44 با ناچ لبه‌ای و طول لیگامنت متفاوت

هر نمونه با طول لیگامنت مشخص توسط دستگاه تست کشش با سرعت 1 mm/min تحت آزمون کشش قرار می‌گیرد. شکل ۸ نمونه‌ای از تست کشش ورق با ناچ لبه‌ای و طول لیگامنت ۱۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

همچنین در شکل ۹ نمایی از شکست نمونه‌های ورق ST44 به ضخامت ۲ میلی‌متر با ناچ لبه‌ای به طول لیگامنت مختلف بعد از تست کشش نشان داده شده است. نتیجه‌ی تست کشش نمونه‌های با ناچ لبه‌ای به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی به ازای هر طول لیگامنت مشخص استخراج شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، تمام نمونه‌های دارای روند مشابهی در نمودار نیرو-جابجایی بوده و به ازای هر لیگامنت دارای ماکزیمم نیرو و جابجایی مشخصی هستند. در مقالات، مقدار تنش ماکزیمم برای هر نمونه با لیگامنت مشخص باید مقداری بین $0.9 \sigma_{ave}$ و $1.1 \sigma_{ave}$ داشته باشد یا به عبارت دیگر می‌توان گفت که $0.9 \sigma_{ave} < \sigma_{max} < \sigma_{ave}$ [۳۰].

جدول ۲ - خواص مکانیکی ورق ST44

مقدار بدست آمده	خواص مکانیکی
۳۰۴	تنش تسلیم (MPa)
۴۴۱	تنش نهایی (MPa)
۰/۴۱	کرنش نهایی (%)
۴۴	کرنش شکست (%)

بررسی کار ضروری شکست ورق ST44 به ضخامت ۲ میلی‌متر

در این قسمت به بررسی کار ضروری شکست ورق ST44 به ضخامت ۲ میلی‌متر به جهت بدست آوردن کار ضروری شکست، بازشدگی بحرانی و زاویه بازشدگی بحرانی ورق پرداخته شده است. جهت انجام آزمایش، نمونه‌هایی به ابعاد $180 \times 60 \times 2$ mm توسط لیزر برش داده شده است. لبه‌های هر ورق توسط وایرکات با طول مشخص ناچ ایجاد شده است. شعاع نوک ناچ و پهنای آن برابر 0.3 mm می‌باشد که نمایی بهتر از آن با مقیاس مشخص شده در شکل ۶ نشان داده شده است. فاصله‌ی بین ناچ‌ها در دو لبه‌ی هر ورق را لیگامنت نامیده می‌شوند. لیگامنت در هر نمونه با نمونه‌ی دیگر متفاوت است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است طول لیگامنت به ترتیب از 9mm، 11mm، 13mm، 15mm، 17mm، 19mm و 9mm برای نمونه‌های ۱ تا ۶ ایجاد شده است.

نمونه را حساب کرده، سپس میانگین آن بدست آورده می‌شود. برای صحت نتایج روش کار ضروری شکست در حالت تنش صفحه‌ای باید تنش ماکزیمم هر نمونه مقداری بین $0.9\sigma_{ave}$ و $1.1\sigma_{ave}$ داشته باشد. اگر نمونه‌ای دارای تنش ماکزیمم بیشتر از $1.1\sigma_{ave}$ و یا کمتر از $0.9\sigma_{ave}$ داشته باشد، در این صورت آن نمونه با طول لیگامنت در نظر گرفته برای آن مناسب نمی‌باشد و باید نمونه‌ی دیگری با طول لیگامنت کمتر یا بیشتر تهیه کرده و دوباره تست کشش روی آن انجام شود تا ماکزیمم تنش نمونه‌ی تهیه شده در بازه‌ی مذکور قرار گیرد و بتوان از آن برای محاسبات بعدی استفاده کرد [۳۱].

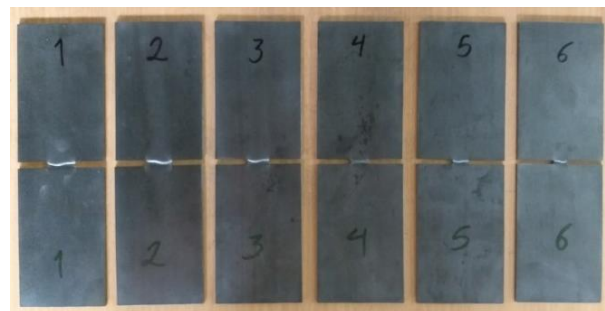
شکل ۱۱ ماکزیمم تنش هر نمونه بر حسب طول لیگامنت که فاصله‌ی بین ناچ نامیده شد، رسم شده است. همچنین مقادیر $0.9\sigma_{ave}$ و $1.1\sigma_{ave}$ نیز رسم شده است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم تنش هر نمونه بین بازه‌ی ذکر شده است. بدین ترتیب نمونه‌های تهیه شده با طول لیگامنت ذکر شده، شرایط تنش صفحه‌ای را برای روش کار ضروری شکست ارضاء می‌کنند. در ادامه‌ی روند روش کار ضروری شکست، مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه با طول لیگامنت مشخص بدست آورده شده است. این کار توسط نرم‌افزار متلب صورت گرفته است. سپس نمودار مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی بر حسب طول لیگامنت برای هر نمونه ورق با ناچ لبه‌ای رسم گردید که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

به کمک رگرسیون بهترین خط عبور داده شده است این داده‌ها توسط نرم‌افزار متلب رسم شده است که معادله‌ی این خط $y=41.426x+554.92$ می‌باشد. طبق توضیحات در بخش مقدمه، این معادله هم‌تراز با رابطه‌ی کار ضروری شکست می‌باشد. بدین ترتیب عرض از مبدأ معادله خط بدست آورده شده برابر کار ضروری ویژه‌ی شکست بوده و برابر 554.92 kJ/m^2 می‌باشد.

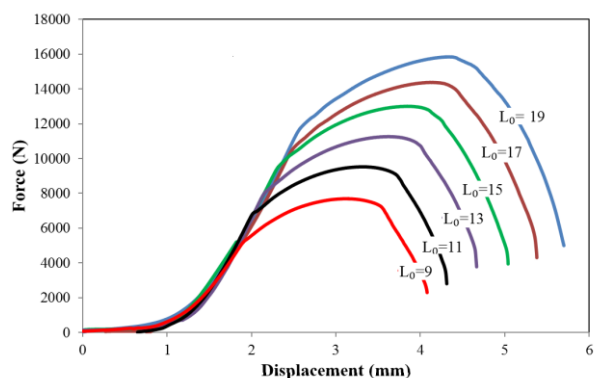
نتیجه‌ی دیگری که از روش کار ضروری شکست می‌توان استخراج کرد بازشدگی بحرانی نوک ترک (δ_c) و زاویه بازشدگی بحرانی نوک ترک (Ψ_c) برای ورق ST44 به ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد. در مراجع [۳۲ و ۳۳] پارامترهایی مانند بازشدگی بحرانی نوک ترک و زاویه بازشدگی بحرانی نوک ترک بر اساس داده‌های ازدیاد طول در طول آزمایش EWF ارائه شده است. بدین منظور نمودار دیگری که ماکزیمم جابجایی بدست آمده از نمودار نیرو-جابجایی برای هر طول لیگامنت



شکل ۸- نمونه تست کشش ورق ST44 با طول لیگامنت ۱۹ میلی‌متر



شکل ۹- نمونه تست کشش بعد از شکست با طول لیگامنت متفاوت



شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با ناچ لبه‌ای و طول لیگامنت مختلف

از آنجایی که روش کار ضروری شکست برای موادی با ضخامت کم و در حالت تنش صفحه‌ای کاربرد دارد، لذا باید این مسئله مورد بررسی قرار بگیرد. طبق اظهارات بیان شده لازم به ذکر است که σ_{ave} میانگین تنش‌های ماکزیمم هر نمونه با لیگامنت مشخص است. بدین ترتیب ماکزیمم تنش هر

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی مکانیزم شکست و بدست آوردن چقرمگی شکست ورق ST44 در حالت تنش صفحه‌ای پرداخته شده است. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

۱- از آنجایی که مقدار تنش ماکزیمم برای هر نمونه با لیگامنت مشخص باید مقداری بین $0.9\sigma_{ave}$ و $1.1\sigma_{ave}$ داشته باشد، پس از بدست آوردن میانگین تنش ماکزیمم تمام نمونه‌ها مشاهده گردید که ماکزیمم تنش هر نمونه بین بازه‌ی ذکر شده می‌باشد. بدین ترتیب نمونه‌های تهیه شده با طول لیگامنت‌های در نظر گرفته شده، شرایط تنش صفحه‌ای را برای روش کار ضروری شکست ارضاء می‌کنند.

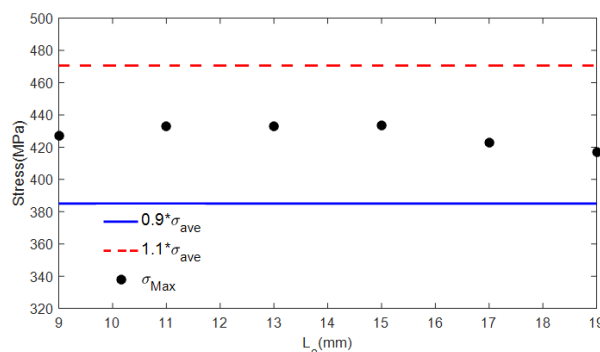
۲- در ادامه‌ی روند روش کار ضروری شکست، مساحت زیر نمودار نیرو- جابجایی برای هر نمونه با طول لیگامنت مشخص بدست آورده و به کمک رگرسیون خط عبور داده شده از این داده‌ها رسم گردید که به معادله‌ی خط $y=41.426x+554.92$ رسیده شد. بدین ترتیب عرض از مبدأ معادله خط بدست آورده شده که همان کار ضروری ویژه‌ی شکست بوده و برابر 554.92 kJ/m^2 می‌باشد.

۳- برای بدست آوردن بازشدگی بحرانی نوک ترک و زاویه بحرانی بازشدگی نوک ترک نمودار ماکزیمم جابجایی بدست آمده از نمودار نیرو- جابجایی برای هر طول لیگامنت رسم گردید. از نمودار رسم شده بازشدگی بحرانی نوک ترک برای ورق ST44 برابر $\delta c=2.5285 \text{ mm}$ و زاویه بحرانی بازشدگی نوک ترک برابر $\Psi c=0.33$ رادیان و برابر با $19/1$ درجه بدست آمد.

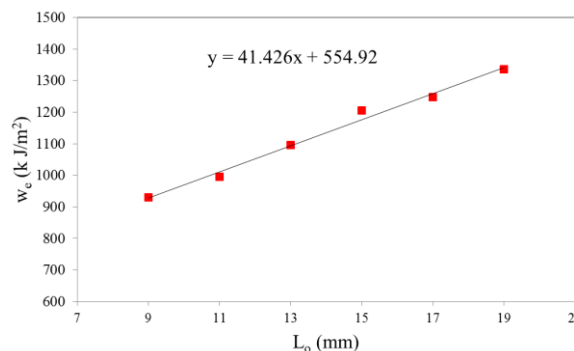
مراجع

- [1] Shank ME. A critical survey of brittle failure in carbon plate steel structures other than ships. American Welding Society; 1954 Jan.
- [2] Parker ER. Brittle behavior of engineering structures. (No Title). 1957 May.
- [3] D, Robinson P, Javidrad FB. A finite element model for delamination propagation in composites. Computers & Structures. 1996 Jul 24;60(6):1093-104.

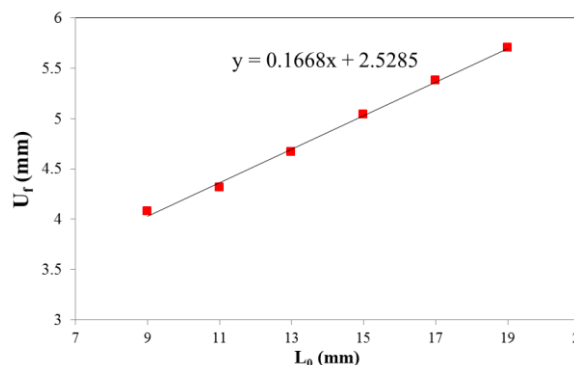
مشخص است و بر حسب طول لیگامنت رسم شدند. سپس همانند قبل با رگرسیون بهترین خط عبوری از داده‌های بدست آمده را رسم و معادله‌ی آن استخراج شدند [۳۳]. این نمودار همراه با بهترین خط عبوری از داده‌ها و معادله‌ی این خط در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به این معادله، بازشدگی بحرانی نوک ترک برای ورق ST44 برابر $\delta c=2.5285 \text{ mm}$ و زاویه بحرانی بازشدگی نوک ترک برابر $\Psi c=0.33$ رادیان (برابر با $19/1$ درجه) می‌باشد.



شکل ۱۱- تغییرات تنش ماکزیمم بر حسب طول لیگامنت



شکل ۱۲- کار ضروری شکست بر حسب طول لیگامنت



شکل ۱۳- ماکزیمم جابجایی بر حسب طول لیگامنت

- stainless steels. *Scripta Materialia*. 2006 Dec 1;55(11):999-1002.
- [14] Broberg KB. On stable crack growth. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1975 Jun 1;23(3):215-37.
- [15] Mai YW, Cotterell B, Horlyck R, Vigna G. The essential work of plane stress ductile fracture of linear polyethylenes. *Polymer engineering & science*. 1987 Jun;27(11):804-9.
- [16] Paton CA, Hashemi S. Plane-stress essential work of ductile fracture for polycarbonate. *Journal of materials science*. 1992 May;27:2279-90.
- [17] Levita G, Parisi L, Marchetti A. The work of fracture in semiductile polymers. *Journal of materials science*. 1994 Sep;29(17):4545-53.
- [18] Pardoën T, Marchal Y, Delannay F. Essential work of fracture compared to fracture mechanics—towards a thickness independent plane stress toughness. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002 Mar 1;69(5):617-31.
- [19] Khodabandelou M, Shadmehr N and Hosni F. Studying the fracture behavior and toughness mechanism of polypropylene modified with impact resistance improving masterbatch (SHIP-PP), the first international masterbatch and compound conference, 2015.
- [20] Haddadi E, Choupani N. A and Abbasi F. Experimental and numerical investigation of the fracture toughness of two-mode polymethyl methacrylate bonded with rubber using the necessary work of failure, *Modares Mechanical Engineering Scientific Research Journal*, Volume 16, Number 3, pp. 132-140, 2015.
- [21] Martinez AB, Gamez-Perez J, Sanchez-Soto M, Velasco JI, Santana OO, Maspocho ML. The essential work of fracture (EWF) method—analyzing the post-yielding fracture mechanics of polymers. *Engineering failure analysis*. 2009 Dec 1;16(8):2604-17.
- [22] MR SK, Schmidova E, Konopík P, Melzer D, Bozkurt F, V Londe N. Fracture [4] Cotterell B, Reddel JK. The essential work of plane stress ductile fracture. *International journal of fracture*. 1977 Jun;13:267-77.
- [5] Mai YW, Cotterell B. On the essential work of ductile fracture in polymers. *International journal of fracture*. 1986 Oct;32:105-25.
- [6] Cotterell B, Chia JY, Hbaieb K. Fracture mechanisms and fracture toughness in semicrystalline polymer nanocomposites. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007 May 1;74(7):1054-78.
- [7] Mai YW, Pilko KM. The essential work of plane stress ductile fracture of a strain-aged steel. *Journal of materials science*. 1979 Feb;14:386-94.
- [8] Mai YW, Cotterell B. Effects of pre-strain on plane stress ductile fracture in α -brass. *Journal of materials science*. 1980 Sep;15:2296-306.
- [9] Pardoën T, Marchal Y, Delannay F. Essential work of fracture compared to fracture mechanics—towards a thickness independent plane stress toughness. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002 Mar 1;69(5):617-31.
- [10] Marchal Y, Delannay F. Comparison of methods for fracture toughness testing of thin low carbon steel plates. *Materials science and technology*. 1998 Nov 1;14(11):1163-8.
- [11] Knockaert R, Doghri I, Marchal Y, Pardoën T, Delannay F. Experimental and numerical investigation of fracture in double-edge notched steel plates. *International Journal of Fracture*. 1996 Dec;81:383-99.
- [12] Marchal Y, Delannay F. Influence of test parameters on the measurement of the essential work of fracture of zinc sheets. *International Journal of Fracture*. 1996 Dec;80:295-310.
- [13] Chehab B, Brechet Y, Glez JC, Jacques PJ, Mithieux JD, Veron M, Pardoën T. Characterization of the high temperature tearing resistance using the essential work of fracture—Application to dual phase ferritic

Stress-Displacement Relationship by the Essential Work of Fracture Concept. Eng. Fract. Mech. 2005, 72, 827–848.

[33] Sarkar R, Chandra SK, De PS, Chakraborti PC, Ray SK. Evaluation of ductile tearing resistance of dual-phase DP 780 grade automotive steel sheet from essential work of fracture (EWF) tests. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019 Oct 1;103:102278.

toughness analysis of automotive-grade dual-phase steel using Essential Work of Fracture (EWF) method. Metals. 2020 Jul 29;10(8):1019.

[23] Lee CF, Sue HJ, Fiscus DM. Refined fixture design for effective essential work of fracture toughness characterization of m-LLDPE thin films. Polymer testing. 2013 Apr 1;32(2):256-64.

[24] Shir Mohammadi M, Hammerquist C, Simonsen J, Nairn JA. The fracture toughness of polymer cellulose nanocomposites using the essential work of fracture method. Journal of materials science. 2016 Oct;51(19):8916-27.

[25] ASTM E8/E8M – 16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2016, DOI: 10.1520/E0008_E0008M-16A.

[26] Clutton E. Essential work of fracture. In European structural integrity society 2001 Jan 1 (Vol. 28, pp. 177-195). Elsevier.

[27] Williams JG, Rink M. The standardisation of the EWF test. Engineering fracture mechanics. 2007 May 1;74(7):1009-17.

[28] Barany T, Czigány T, Karger-Kocsis J. Application of the essential work of fracture (EWF) concept for polymers, related blends and composites: A review. Progress in Polymer Science. 2010 Oct 1;35(10):1257-87.

[29] ASTM E8/E8M-16a (2016) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International, West Conshohocken. <http://www.astm.org>

[30] Abdellah MY, Zuwawi AR, Azam SA, Hassan MK. A comparative study to evaluate the essential work of fracture to measure the fracture toughness of quasi-brittle material. Materials. 2022 Jun 27;15(13):4514.

[31] Stenström C, Eriksson K, Bobaru F, Golling S, Jonsén P. The essential work of fracture in peridynamics. International Journal of Fracture. 2023 Jul 10:1-24.

[32] Cotterell, B.; Pardo, T.; Atkins, A.G. Measuring Toughness and the Cohesive