



بررسی تجربی ویژگی‌های سطح شکست نمونه نامتجانس (با درز جوش افقی) آزمایش ضربه سقوطی فولاد API X65

مصطفی تعظیمی^۱، سید حجت هاشمی^{۲*} و سعید رهنما^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۴

چکیده

در این پژوهش شکست‌نگاری نمونه نامتجانس (با درز جوش افقی) آزمایش ضربه سقوطی از جنس فولاد API X65 برای اولین بار انجام شده است. مقطع شکست نمونه آزمایش شامل سه ناحیه فلز پایه، متأثر از حرارت و جوش است. آزمایش طبق استاندارد API 5L انجام شده است. ترک با شکست تورقی از ناحیه ریشه شیار شروع شده و در ادامه با تغییر زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه‌ی سطحی، به شکست نرم برشی تبدیل شده و تا ناحیه شکست معکوس ادامه دارد. در عکس‌های حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی در هر سه ناحیه، علائم شکست نرم مشاهده شد که شامل حفره‌های مخروطی با اندازه، جهت و شکل متفاوت است. بررسی حفره‌های مخروطی از ابتدا تا انتهای سطح شکست نشان می‌دهد که بارگذاری از حالت کششی در ریشه شیار به بارگذاری برشی در انتهای سطح شکست تبدیل می‌شود؛ همچنین در ناحیه فلز پایه علائم شورون ناقص با تراکم بالا در مرکز سطح شکست مشاهده شد. در ناحیه برخورد چکش، شکست معکوس تورقی مشاهده شد که از هر دو طرف توسط سطوح برشی با زاویه ۴۵ درجه محصور شده است. سطح شکست نرم محاسبه شده در محدوده‌ی استاندارد بوده و بیانگر چقرمگی مطلوب این فولادها جهت استفاده در لوله‌های انتقال گاز است.

کلمات کلیدی: آزمایش ضربه سقوطی؛ سطح شکست؛ نمونه نامتجانس؛ فولاد API X65؛ لوله‌های انتقال گاز.

Experimental Study of Fracture Surface Characteristics of Inhomogeneous Drop Weight Tear Test Specimen Made from API X65 Steel

M. Tazimi¹, S.H. Hashemi^{2*}, S. Rahnama³

¹ Ph.D. Student, Dept. of Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran.

² Prof., Dept. of Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran.

³ Asst. Prof., Dept. of Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran.

Abstract

In this study, the fractography of the inhomogeneous specimen (including seam weld) of API X65 steel was performed for the first time by the drop weight tear test. The fracture surface of the test specimen consisted of three zones of base metal, heat affected zone and weld metal. The test was performed according to the API 5L standard. The crack initiated with a cleavage fracture from the notch root and then transformed to a shear failure with a 45 degree angle change to the surface plate and continued to the inverse fracture zone. SEM images of all three zones showed signs of ductile fracture including dimples of varying size, orientation and shape. Dimples study from beginning to the end of fracture surface showed that loading from the tensile state at the notch root was changed to shear loading at the end of fracture surface. Also, faint chevron marks with high density were observed in the center of fracture surface in the base metal. In the hammer impact zone, an inverse cleavage fracture was observed, which was enclosed on both sides by shear surfaces with an angle of 45 degree. The calculated ductile fracture surface was within the standard range and indicated the confirmed toughness of these steels for the use in gas transportation pipe lines.

Keywords: Drop Weight Tear Test; Fracture Surface; Inhomogeneous Specimen; API X65 Steel; Gas Transportation Pipelines.

۱- مقدمه

امروزه نیاز روزافزون به استفاده از انرژی‌های پاک با آلاینده‌گی کمتر، باعث گسترش استفاده از گاز طبیعی شده است. از طرفی ضرورت کاهش هزینه‌های تولید و انتقال آن باعث توسعه صنعت لوله‌سازی شده است. انتقال گاز طبیعی در لوله‌های با قطر بیشتر، فشار بالاتر و همچنین ضخامت کمتر، باعث کاهش هزینه‌های انتقال می‌شود. از این رو استفاده از فولادی ضروری است که همزمان استحکام و چقرمگی بالایی داشته باشد. لوله‌های قطور و پر فشار انتقال گاز طبیعی در ایران عمدتاً از جنس فولاد API X65 است که به روش جوشکاری مارپیچ تولید می‌شود. در دهه‌های اخیر، مشخص گردید که آزمایش ضربه سقوطی^۲ به شکل بهتری مقاومت شکست نرم^۳ را نسبت به آزمایش شارپی^۴ نشان می‌دهد [۱]. در آزمایش ضربه سقوطی ضخامت نمونه با ضخامت لوله یکسان است (برخلاف آزمون ضربه شارپی که ابعاد مقطع نمونه ۱۰mm×۱۰mm بوده و برای لوله‌های ضخیم‌تر با عملیات ماشینکاری، ضخامت استاندارد آماده می‌شود)؛ همچنین به دلیل اینکه در آزمایش ضربه سقوطی مسیر شکست دارای طول کافی است (۷۶mm) در طول مسیر شکست، رشد پایدار ترک نیز اتفاق می‌افتد. درصد سطح شکست نرم (برشی) و ترد از کل سطح شکست حاصل از آزمایش ضربه سقوطی، کیفیت لوله فولادی را تعیین می‌کند. فولادهایی که درصد سطح شکست نرم در آنها بیشتر از ۸۵ درصد باشد، چقرمه بوده و می‌تواند در لوله‌های انتقال گاز مورد استفاده قرار گیرد [۱].

در سال‌های اخیر بررسی سطح شکست نرم و ترد در لوله‌های فولادی توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. نواحی مختلف سطح شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی و تأثیر تغییرات دمای نورد در فولاد API X80 توسط سانگ و همکاران، مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. درصد انواع سطوح شکست (نرم و ترد) در این آزمایش اندازه‌گیری شده و ارتباط آن با ریزساختار، انرژی جذب شده آزمایش ضربه سقوطی و کرنش‌سختی ناحیه محل برخورد چکش، مورد بررسی قرار گرفته است. با کاهش دمای نورد، درصد حجمی

فریت سوزنی^۵ و در نتیجه انرژی جذب شده در آزمایش ضربه سقوطی افزایش می‌یابد. با افزایش انرژی جذب شده، چقرمگی فولاد افزایش می‌یابد. شکل ۱ نمونه‌ای از تصویر واقعی و شماتیک سطح شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی و نواحی مختلف آن را نشان می‌دهد. شکست تورقی^۶، علائم لایه‌لایه^۷ و همچنین شکست معکوس^۸ در نواحی مختلف سطح شکست مشاهده می‌شود [۲].

در آزمایش ضربه سقوطی سطوح شکست معکوس (که سطوح شکست غیرعادی^۹ نیز نامیده می‌شود) معمولاً در فولادهای با چقرمگی بالا مشاهده می‌شود [۳]. سطوح شکست معکوس در آزمایش ضربه سقوطی بر حسب دلایل تشکیل آن به سه دسته کلی تقسیم می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است؛ نوع اول که شکست معکوس نامیده می‌شود و از نوع شکست تورقی است، در ناحیه محل برخورد چکش با نمونه و ناحیه‌ای اتفاق می‌افتد که ضخامت سطح شکست به صورت ناگهانی افزایش یافته است. در نوع دوم یک ناحیه شکست تورقی وسیع از مرکز سطح شروع شده و به انتهای نمونه ختم می‌شود. این ناحیه معمولاً وسیع است و ضخامت قسمت انتهایی آن بیشتر از ضخامت قسمت ابتدایی آن است. در نوع سوم یک ناحیه وسیع‌تر فقط در مرکز سطح مشاهده می‌شود. شکست تورقی در این نوع نزدیک به شیار دیده می‌شود و ضخامت قسمت ابتدایی آن از ضخامت قسمت انتهایی بیشتر است [۳].

یانگ در سال ۲۰۱۴ به بررسی دلایل بوجود آمدن انواع سطوح شکست غیرعادی در آزمایش ضربه سقوطی پرداخت [۴]. افزایش کرنش فشاری در ناحیه محل برخورد چکش، اصطکاک تکیه‌گاه‌ها، افزایش اندازه ناحیه پلاستیک در فولادهای با استحکام و چقرمگی بالا در ناحیه محل برخورد چکش، تغییر سرعت شکست و همچنین افزایش کارسختی به دلیل تغییر مود شکست از حالت خمش فشاری به خمش خالص و کششی از مهم‌ترین دلایل تشکیل سطوح شکست غیرعادی است [۴]. به طور کلی اصلاح تکیه‌گاه‌های ماشین به منظور کاهش نیروی اصطکاک، باعث کاهش سطوح نوع

⁵ Acicular Ferrite (AF)

⁶ Cleavage Fracture

⁷ Delamination

⁸ Inverse Fracture

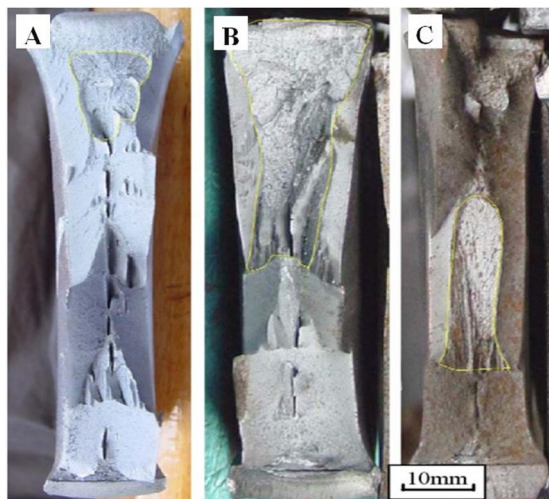
⁹ Abnormal Fracture Area

¹ American Petroleum Institute

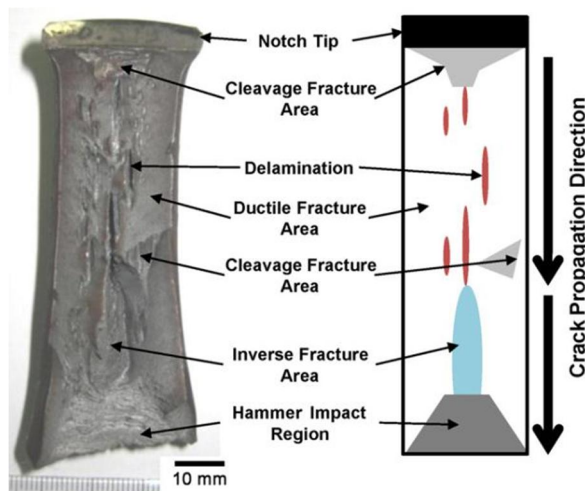
² Drop Weight Tear Test

³ Ductile Fracture

⁴ Charpy Test



شکل ۲- انواع سطوح شکست غیرعادی، (A) نوع اول، (B) نوع دوم، (C) نوع سوم [۳]



شکل ۱- شکست نگاری نوری و شماتیک سطح شکست نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی [۲]

ضخامت‌های ۱۹ و ۳۱ میلی‌متر بررسی شده است. شروع ترک، طبق پیشنهاد کوبایاشی [۷]، از بیشینه نیرو و از محل ریشه شیار شروع شده و در ادامه به سطوح برشی تبدیل می‌شود. سطوح برشی سطح شکست نمونه‌ها منطبق با قسمت پایدار رشد ترک در منحنی نیرو-جابجایی است [۸].

در پژوهشی که توسط آقای الدناف و همکاران انجام شده است [۹]، آزمایش CT برای تعیین ضرایب ماده و پارامترهای جانسون-کوک در شبیه‌سازی، جهت به دست آوردن چقرمگی شکست در راستاهای مختلف فقط فلز پایه، انجام شده است. همچنین با عکس‌برداری از سطح شکست نمونه CT ریزساختار و بافت آن را مشخص کرده‌اند که شامل فریت سوزنی^۵، فریت چندوجهی^۶، فریت شبه‌چندوجهی^۷، فریت بینیتی دانه‌ای^۸ و مارتنزیت-آستنیت^۹ است [۹].

در تنها تحقیق انجام شده روی نمونه حاوی درز جوش، مجیدی و همکارش ویژگی‌های مرئی سطح شکست درز جوش ماریپیچ در لوله‌های فولادی انتقال گاز از نوع API X65 را بررسی کرده‌اند [۱۰]. شکل ۳ نمونه‌ی آزمایشگاهی، حاوی درز جوش در وسط نمونه و در راستای مسیر رشد

اول می‌شود. استفاده از شیار تیز باعث کاهش سطوح نوع دوم می‌شود و سطوح نوع سوم از مشخصات ذاتی رشد ترک بوده و قابل اصلاح نیست [۴].

با افزایش کارسختی، سطح ناحیه شکست معکوس افزایش پیدا می‌کند [۵]. افزایش کارسختی ناشی از برخورد چکش، به‌صورت پیش‌کنش فشاری در نمونه باقی مانده و باعث تغییر ویژگی‌های شکست نمونه ضربه سقوطی می‌شود. استفاده از نمونه‌های با شیار پشتی^۱، باعث کاهش کارسختی و در نتیجه کاهش سطح شکست معکوس می‌شود [۵]. آمانو و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر پیش‌کنش بر تشکیل سطوح شکست غیرعادی در آزمایش ضربه سقوطی فولاد خطوط انتقال با انرژی شکست بالا پرداخته‌اند [۶]. در همه نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی با شیارهای شورون^۲، پرسی^۳ و پیش‌ترک استاتیکی^۴، سطوح شکست غیرعادی مشاهده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تشکیل سطوح شکست غیرعادی در نزدیکی محل برخورد چکش می‌تواند به دلیل پیش‌کنش فشاری ناشی از برخورد چکش باشد [۶].

در تحقیقی که توسط فانگ و همکاران انجام شده است، ارتباط سطح شکست با منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌هایی با

⁵ Acicular Ferrite

⁶ Polygonal Ferrite (PF)

⁷ Quasi Polygonal Ferrite (QPF)

⁸ Granular Bainitic ferrite (GF)

⁹ Martensite/Austenite (M/A)

¹ Back Slot

² Chevron Notch (CN)

³ Pressed Notch (PN)

⁴ Static Pre-cracked (SPC)



شکل ۳- نمونه‌ی حاوی درز جوش در وسط نمونه و در راستای مسیر رشد ترک آزمایش ضربه سقوطی [۱۰]

۲- مراحل تحقیق و انجام آزمایش

۲-۱- مشخصات ماده نمونه

لوله استفاده شده در این آزمایش با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر از جنس فولاد API X65 بوده که با جوشکاری ماریپچ تولید می‌شود. ضخامت درز جوش در قسمت داخلی لوله ۱۶ میلی‌متر و در قسمت خارجی لوله ۲۰ میلی‌متر است (شکل ۴). به‌منظور دستیابی به استحکام و چقرمگی همزمان بالا، ورق مورد استفاده با فرایند خنک‌کاری سریع^۵ و نورد کنترل‌شده ترمومکانیکال^۶ تولید می‌شود [۱۱].

مقطع نمونه آزمایش شامل فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش است که در شکل ۵ ریزساختار این نواحی نشان داده شده است [۱۱]. ناحیه جوش درشت دانه با اندازه‌ی حدود ۴-۲ میکرومتر است. ساختار این ناحیه فریت سوزنی بوده که در مرز بین دانه‌ها فریت پرویوتکتوئید^۷ و فریت ویدمنشتاتن^۸ دیده می‌شود (شکل ۵-A و ۵-B). شکل ۵-C و ۵-D به ترتیب ناحیه درشت‌دانه و ریزدانه‌ی متأثر از حرارت را نشان می‌دهد. این ناحیه از بینیت^۹ فریت چندوجهی و فریت سوزنی تشکیل شده است. درشت دانه شدن ناحیه متأثر از حرارت نزدیک‌تر به ناحیه جوش، به‌دلیل تبلور مجدد^{۱۰} ناشی از حرارت جوش است. شکل ۵-E ریزساختار فلز پایه را نشان می‌دهد. این ناحیه از بافت یکنواخت ریزدانه فریت سوزنی-بینیت تشکیل شده است.

ترک را نشان می‌دهد. ترک از ریشه شیبار با شکست تورقی شروع شده و در ادامه بخش قابل توجهی از مسیر رشد ترک در ناحیه متأثر از حرارت^۱ است. در انتهای مسیر رشد ترک در محل برخورد چکش، ترک وارد ناحیه فلز پایه^۲ می‌شود [۱۰].

حرارت ناشی از جوشکاری هنگام تولید لوله‌های انتقال گاز باعث بوجود آمدن سه ناحیه مختلف روی لوله می‌شود که عبارتند از ۱- ناحیه فلز پایه، ۲- ناحیه متأثر از حرارت و ۳- ناحیه جوش^۳. به‌دلیل حرارت ناشی از جوشکاری، خواص مکانیکی و همچنین ریزساختار کریستالی در این سه ناحیه متفاوت است. با بررسی منابع موجود مشخص گردید که در نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی، مسیر رشد ترک فقط شامل فلز پایه و یا فلز جوش است. با توجه به تفاوت خواص مکانیکی و ریزساختار در نواحی مختلف، مشخصات سطح شکست نمونه‌ای که شامل همه نواحی باشد، گزارش نشده است. در تحقیق حاضر برای نخستین بار شکست‌نگاری نمونه نامتجانس^۴ (با درز جوش افقی) آزمایش ضربه سقوطی از جنس فولاد API X65 انجام شده است. نمونه‌ی آماده شده حاوی درز جوش بوده که به‌صورت افقی در دستگاه آزمایش قرار می‌گیرد؛ بنابراین مسیر رشد ترک در راستای عمود بر مسیر جوش بوده و مقطع شکست نمونه همزمان شامل سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش است.

⁵ Accelerated Cooling (AC)

⁶ Thermo-mechanical Controlled Rolling (TMCR)

⁷ Proeutectoid Ferrite

⁸ Widmanstatten Ferrite

⁹ Bainite

¹⁰ Recrystallization

¹ Heat Affected Zone (HAZ)

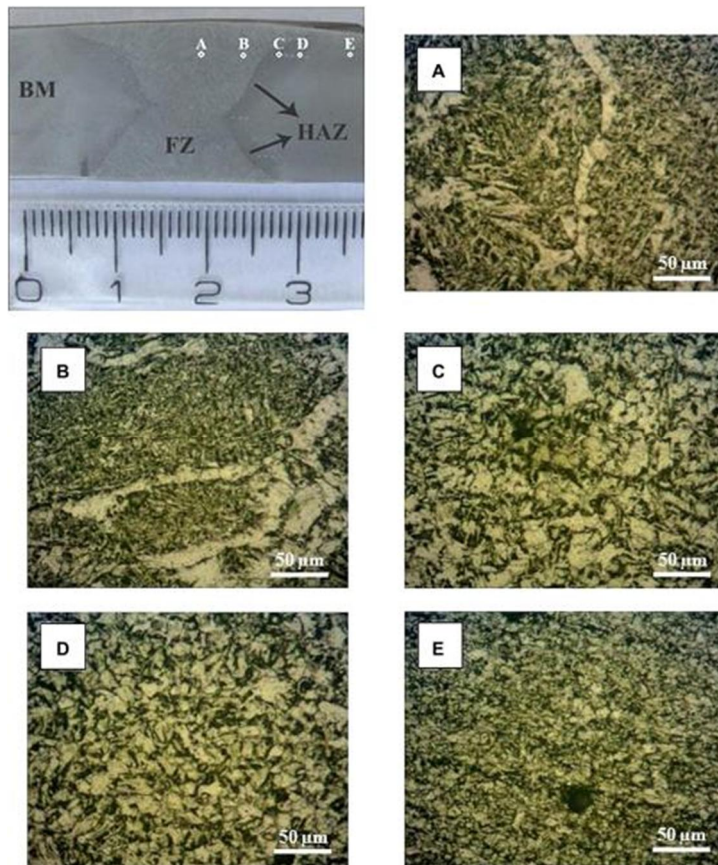
² Base Metal (BM)

³ Weld Metal

⁴ Inhomogeneous



شکل ۴- لوله‌ی API X65 با درز جوش ماریچ و نمونه آزمایشگاهی جدا شده از آن



شکل ۵- ریزساختار ناحیه جوش، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه فلز پایه در لوله فولادی آزمایش شده [۱۱]

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد API X65 در سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش

(تنش در راستای محیطی لوله) [۱۱ و ۱۲]

	تنش تسلیم (مگاپاسکال)		تنش کششی (مگاپاسکال)		تنش تسلیم (مگاپاسکال)		تنش کششی (مگاپاسکال)		
	استاندارد	اندازه‌گیری شده	استاندارد	اندازه‌گیری شده	استاندارد	اندازه‌گیری شده	استاندارد	اندازه‌گیری شده	
حداقل	۴۴۸	۴۷۹	۵۳۱	۵۸۲	۰/۷۷	۲۴	۳۰	۲۶۷	۲۱۷
فلز پایه	۵۹۸	۵۸۹	۷۵۸	۶۷۲	۰/۹۳	۳۸	۳۸	۲۷۹	۲۲۸
میانگین	۵۳۸	۵۳۸	۶۲۴	۶۲۴	۰/۸۶	۳۴	۳۴	۲۶۴	۲۲۲
ناحیه									
متأثر از									
حرارت									
میانگین									
حداقل									
ناحیه									
جوش									
میانگین									

استاندارد ماشینکاری شده است (شکل ۴). برش در دستگاه برش با آب به دلیل آنکه سرد است، ساختار کریستالی فولاد را تغییر نمی‌دهد. سپس با استفاده از دستگاه تخلیه الکتریکی، شیار شورون به عمق ۵/۱ میلی‌متر در وسط نمونه ایجاد گردیده است (شکل ۶). طبق استاندارد به دلیل اینکه نسبت قطر به ضخامت بیشتر از ۴۰ است، پرس انحنای نمونه تأثیری در نتایج ندارد.

۲-۳- روش انجام آزمایش

آزمایش به وسیله دستگاه ضربه سقوطی ساخته شده در دانشگاه بیرجند با ظرفیت ۳۰۰۰۰ ژول و در دمای محیط انجام شد (شکل ۷). مرکز شیار نمونه باید منطبق بر مرکز چکش باشد، به همین منظور نمونه به کمک سنج مخصوص در وسط گیره دستگاه قرار گرفته و پیچ‌های آن به کمک گشتاورسنج^۳ بسته می‌شود (شکل ۸). چکش دستگاه به وزن ۷۰۰ کیلوگرم از ارتفاع دو متری (فاصله لبه پایین چکش با

فریت سوزنی ساختار مناسب جهت افزایش چقرمگی فولاد API است. طبیعت درهم قفل‌شونده^۱ فریت سوزنی با اندازه‌ی دانه‌بندی کوچک آن، بیشترین مقاومت در برابر رشد ترک تورقی را دارد [۱۱].

خواص مکانیکی این نواحی شامل، استحکام تسلیم، استحکام کششی، نسبت استحکام تسلیم به کششی، درصد تغییر طول، انرژی ضربه شاریپی و سختی در نواحی مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه

ابعاد نمونه آزمایش ضربه سقوطی با مشخصات هندسی طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۳۰۵، ۷۶/۲ و ۱۴/۳ میلی‌متر مطابق استاندارد API SL است [۱۳ و ۱۴]. پس از جدا کردن نمونه از راستای درز جوش لوله به کمک دستگاه سنگ فرز دستی با حاشیه یک سانتی‌متر، به وسیله پرس انحنای آن گرفته شده و با استفاده از دستگاه برش با آب^۲ تا ابعاد

^۱ Interlocking Nature

^۲ Water Jet

^۳ Torque Meter

نمونه را نشان می‌دهد. مسیر شکست عمود بر راستای جوش است. سطوح شکست از دیدگاه ماکروسکوپی و میکروسکوپی، مورد بررسی قرار گرفته که نتایج به شرح ذیل است.

۳-۱- بررسی سطح شکست از دیدگاه ماکروسکوپی

شکل ۱۱ سطح شکست سمت چپ نمونه را نشان می‌دهد که با نگاه مرئی ده ناحیه مختلف را می‌توان روی آن مشاهده کرد.

شکست در ناحیه یک که از نوع شکست تورقی است، از زیر شیار شورون شروع می‌شود (شکل ۱۲).

لبه بالای نمونه) رها شده و سرعت آن در لحظه برخورد ۶/۲۶ متر بر ثانیه است که انرژی لازم برای شکست نمونه در یک مرحله را دارد. در محاسبه سرعت لحظه برخورد، از اصطکاک مجموعه نگهدارنده چکش در ریل دستگاه صرف‌نظر شده و سرعت به‌صورت تئوری از رابطه سقوط آزاد محاسبه شده است. بعد از انجام آزمایش و شکستن نمونه، سطوح شکست مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج

شکل ۹ مسیر شکست نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی و شکل ۱۰ سطوح شکست نیمه سمت چپ و راست



شکل ۶- شیار شورون به عمق ۵/۱ میلی‌متر در وسط نمونه آزمایش ضربه سقوطی



شکل ۸- بستن پیچ‌های نمونه آزمایش در گیره دستگاه با کمک گشتاورسنج



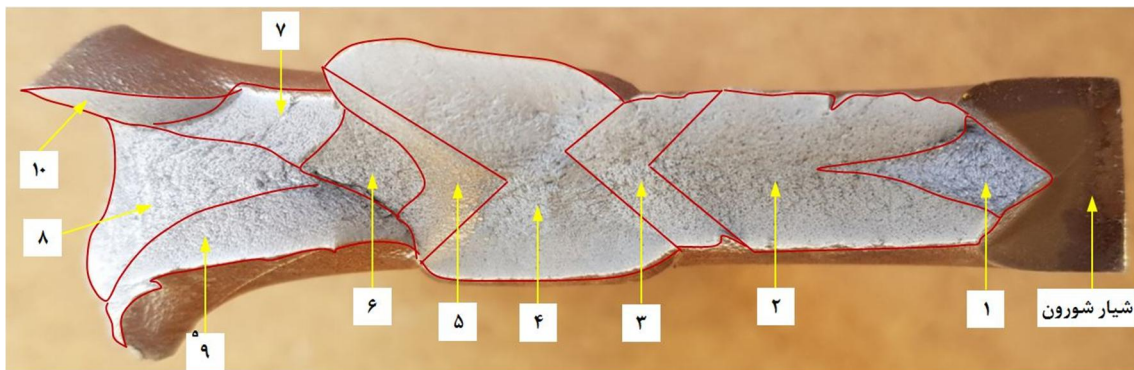
شکل ۷- دستگاه آزمایش ضربه سقوطی با ظرفیت ۳۰۰۰۰ ژول



شکل ۹- مسیر رشد ترک در نمونه آزمایش



شکل ۱۰- سطح شکست نمونه آزمایش، (A) نیمه سمت چپ و (B) نیمه سمت راست



شکل ۱۱- نواحی مختلف سطح شکست نیمه سمت چپ نمونه نامتجانس آزمون ضربه سقوطی از جنس فولاد API X65، نواحی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ ناحیه فلز پایه، ۳ و ۵ ناحیه متأثر از حرارت و ۴ ناحیه جوش است (جهت رشد ترک از راست به چپ است)

حفره‌های مخروطی^۳ محصور شده است. صفحات رخبرگی از علائم شکست تورقی است [۱۵]. تخت بودن سطح شکست و صفحات رخبرگی، بیانگر شکست ترد در این ناحیه است. این شکست ترد تورقی که شرط صحت آزمایش ضربه سقوطی است [۱۳]، تا ۱۴/۵ میلی‌متر از مسیر شکست امتداد دارد و مساحت آن تقریباً ۴۰ میلی‌متر مربع است.

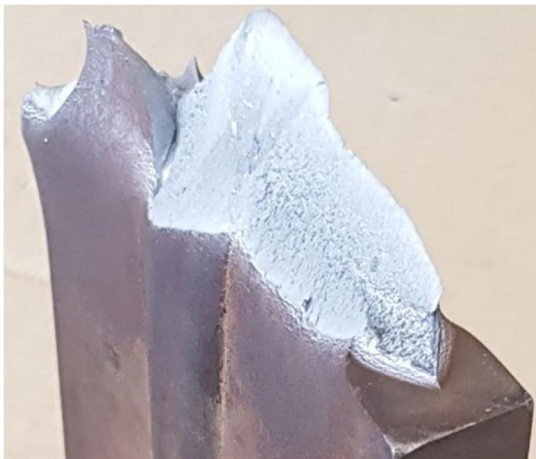
انرژی لازم برای شروع ترک انرژی الاستیک نمونه است. با افزایش انرژی الاستیک نمونه و افزایش تمرکز تنش در ریشه شیار، شکست شروع می‌شود. شکست در این ناحیه تخت و عمود بر صفحه سطحی نمونه با کرنش صفحه‌ای است. در شکل ۱۳ که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ از ناحیه یک گرفته شده، صفحات رخبرگی^۲ به وسیله

³ Dimple

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)

² Facet

حفره‌های مخروطی با اندازه‌های مختلف مشاهده می‌شود. حفره‌های مخروطی از علائم شکست نرم است که از تجمع حفره‌های بسیار ریز^۱ ناشی از ناخالصی‌ها یا مواد فاز دوم^۲ تشکیل می‌شود [۱۵ و ۱۶]. اختلاف اندازه این حفره‌ها بیانگر ناهمگن بودن اندازه دانه‌بندی در این ناحیه است. کدر و مات بودن سطح شکست، حفره‌های مخروطی و همچنین شکست برشی با زاویه ۴۵ درجه از علائم شکست نرم در این ناحیه است. با توجه به اینکه نیروی چکش از بالا وارد می‌شود و ناحیه دو در نیمه پایینی تار خنثی قرار گرفته، تنش در این ناحیه کششی است. بررسی دقیق حفره‌های مخروطی نشان می‌دهد، همه آنها متحدالمرکز هستند که بارگذاری مود یک کششی در این ناحیه را تأیید می‌کند.



شکل ۱۴- تغییر زاویه شکست تورقی ریشه شیار به صفحه شکست برشی با زاویه ۴۵ درجه در امتداد مسیر رشد ترک

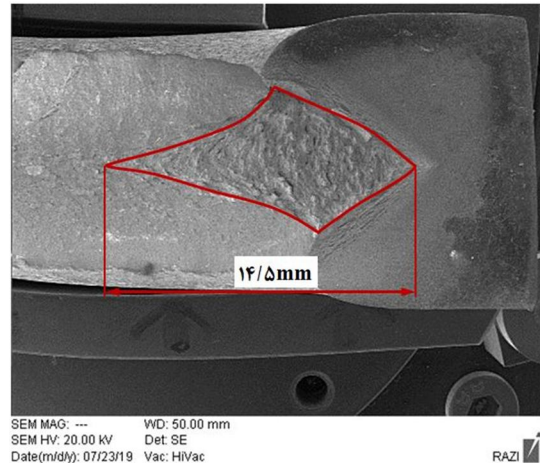
شورون‌ها شکل‌های میکروسکوپیکی وی-شکل از سطح شکست هستند که محل شروع و مسیر رشد ترک را مشخص می‌کنند و بیانگر رشد و توقف متناوب ترک است [۱۷]. در ناحیه دو علائم شورون ناقص^۳ با زاویه‌ی ۴۵ درجه به سمت مرکز سطح شکست و در راستای مسیر رشد ترک مشاهده شده است (شکل A-۱۶). این علائم در یک نیمه از ضخامت نمونه (به همین دلیل ناقص است) و در ناحیه فلز پایه مشاهده شده است. زاویه شورون‌ها نشان می‌دهد که منشأ

¹ Microvoid Coalescence (MVC)

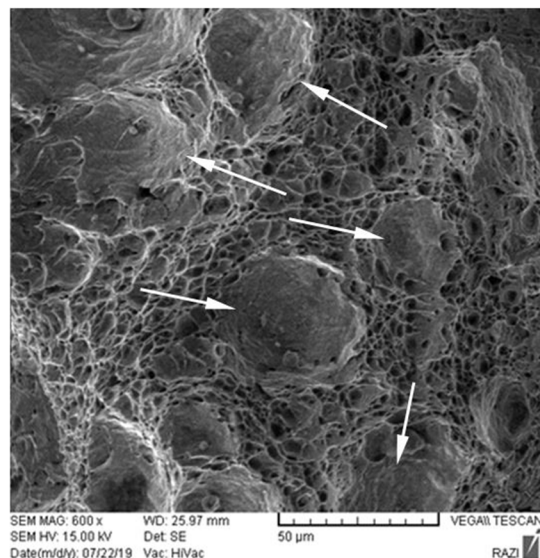
² Inclusions

³ Second Phase Particles

⁴ Faint Chevron-Mark



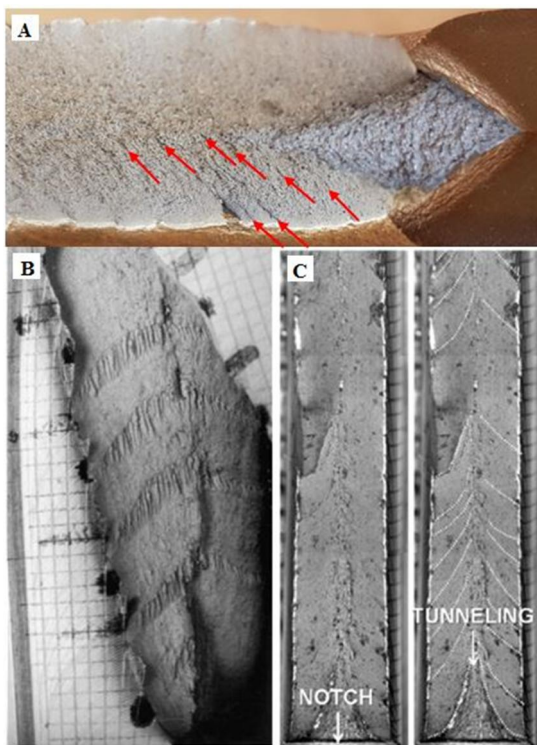
شکل ۱۲- ناحیه لوزی شکل شکست ترد تورقی زیر شیار شورون (جهت رشد ترک از راست به چپ است)



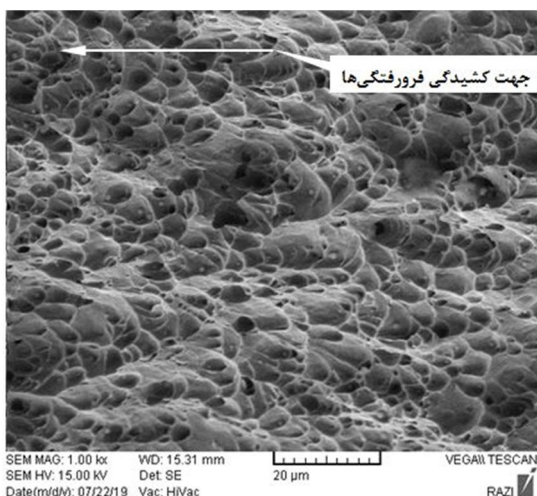
شکل ۱۳- صفحات رخ‌برگی ناحیه زیر شیار شورون (جهت رشد ترک از راست به چپ است)

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، در ادامه مسیر رشد ترک، صفحه شکست تحت تورقی به صفحه‌ای با زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه سطحی نمونه تبدیل می‌شود که تا پایان ناحیه شش ادامه دارد. تغییر زاویه صفحه شکست به صفحه‌ای با زاویه ۴۵ درجه، بیانگر مکانیزم غالب تنش صفحه‌ای در این ناحیه است [۱۶].

سطح شکست ناحیه دو که از جنس فلز پایه است، کدر و مات است. در شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپیکی ناحیه دو با

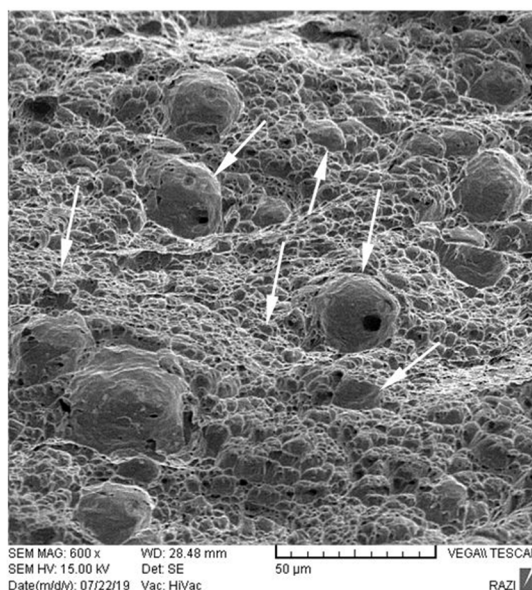


شکل ۱۶- علائم شورون سطح شکست، (A) علائم شورون ناقص در فولاد API X65 در ناحیه دو (فلز پایه) (جهت رشد ترک از راست به چپ است)، (B) علائم شورون در ناحیه فلز پایه فولاد API X80 (جهت رشد ترک از پایین به بالا است) [۱۸]، (C) علائم شورون وی-شکل کامل در فولاد API X100 (جهت رشد ترک از پایین به بالا است) [۱۹]



شکل ۱۷- کشیدگی حفره‌های مخروطی به یک سمت در ناحیه پنج (جهت رشد ترک از راست به چپ است)

ترک مرکز سطح است. همان‌طور که در شکل A-۱۶ مشاهده می‌شود، اندازه آنها به سمت مرکز سطح کوچک‌تر ولی فراوانی آنها بیشتر است. به دلیل نسبت تنش تسلیم به کششی^۱ پایین فولادهای API X65، گردشگی نوک ترک و همچنین بارگذاری دینامیکی، این علائم به صورت ناقص مشاهده شده است [۱۷]. این درحالی است که در فولادهای با درجه بالاتر، به عنوان مثال X80 و X100؛ این علائم به صورت وی-شکل کامل و در نمونه‌های با ضخامت بیشتر به صورت کمان مشاهده شده است (شکل B-۱۶ و C-۱۶) [۱۸ و ۱۹].

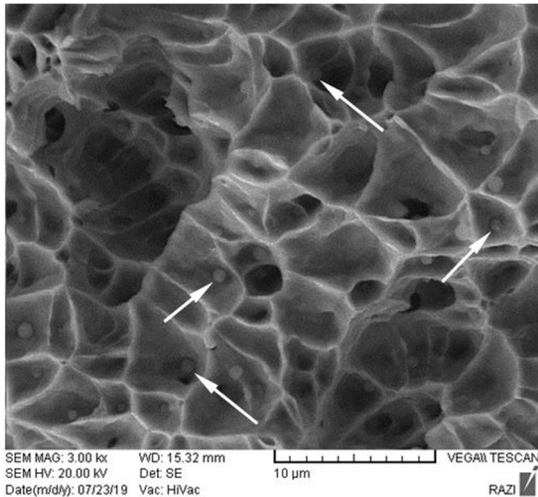


شکل ۱۵- حفره‌های مخروطی متحدالمرکز با اندازه‌های مختلف در ناحیه دو (جهت رشد ترک از راست به چپ است)

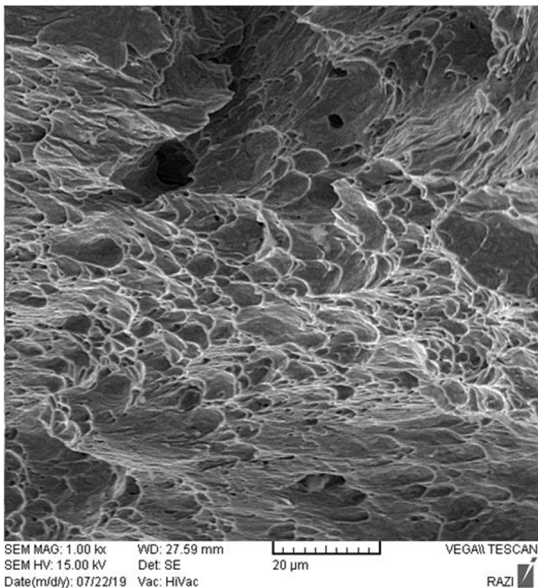
ناحیه سه و پنج نواحی متأثر از حرارت است. در این نواحی به دلیل حرارت ناشی از جوش، تبلور مجدد صورت گرفته و اندازه کریستال‌ها کوچک‌تر می‌شود. در ناحیه پنج حفره‌های مخروطی با اندازه‌های کوچک‌تر نسبت به ناحیه دو مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، همه حفره‌ها به یک سمت کشیده شده است که نشان از تغییر بارگذاری به مود ترکیبی کششی-برشی است.

^۱ Yield Ratios

از ۱۴/۳ میلی‌متر ضخامت اولیه به ۲۲/۴ میلی‌متر می‌رسد. در شکل ۲۲ رخ‌برگ‌های تورقی در این ناحیه مشاهده می‌شود که بیانگر شکست ترد است.



شکل ۱۸- حفره‌های مخروطی در ناحیه چهار و ناخالصی‌های آلیاژی که با پیکان نمایش داده شده است (جهت رشد ترک از راست به چپ است)



شکل ۱۹- حفره‌های مخروطی کشیده شده در راستای مسیر رشد ترک در ناحیه شش (جهت رشد ترک از راست به چپ است)

ناحیه چهار ناحیه جوش است که حرارت ناشی از آن باعث تبلور مجدد کریستال‌ها می‌شود. به دلیل سختی بالای ناحیه جوش (جدول ۱)، تمایل به تغییر شکل پلاستیک در این ناحیه کمتر است. در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۱۸، حفره‌های مخروطی هم اندازه و متحدالمرکز بوده که بیانگر تمایل کمتر این ناحیه به تغییر شکل پلاستیک است؛ همچنین با توجه به شکل حفره‌ها می‌توان نتیجه گرفت که نوع بارگذاری به صورت مود کششی است. در این ناحیه ناخالصی^۱ آلیاژی مشاهده شده است.

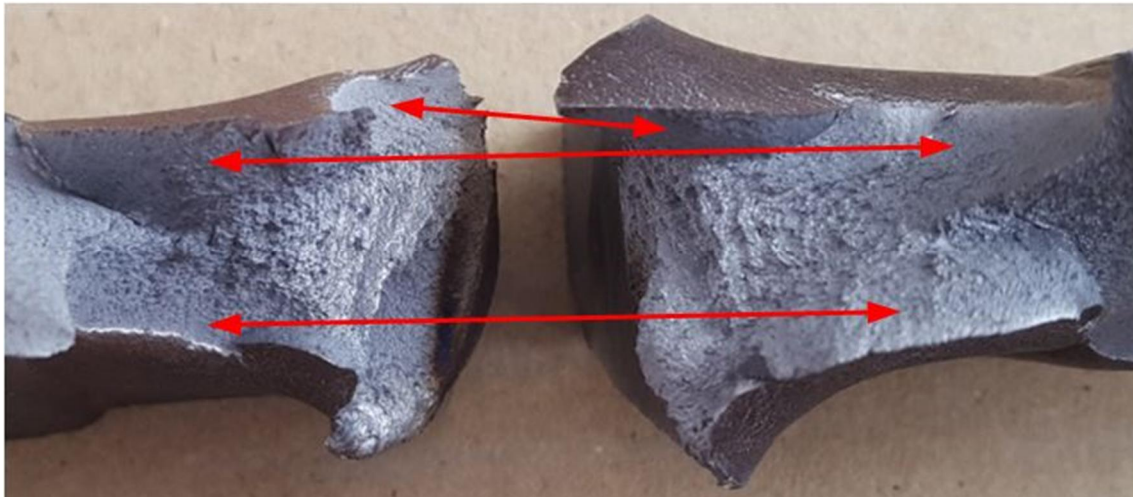
تصویر میکروسکوپیک ناحیه شش از جنس فلز پایه در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مقایسه این ناحیه با ناحیه دو نشان می‌دهد که آن نیز فلز پایه می‌باشد، حفره‌ها در راستای مسیر ترک کشیده شده است که بیانگر مود بارگذاری برشی در این ناحیه است.

پس از ناحیه شش مکانیزم شکست برشی با صفحه ۴۵ درجه، به شکست برشی وی-شکل (یا مدل فنجان-فنجان^۲ [۲۰]) تغییر می‌کند. لبه‌های برشی نواحی هفت، نه و ده در دو طرف مرکز سطح و تا انتهای مسیر شکست امتداد دارد. به دلیل اینکه تنش در این نواحی از حالت خمش فشاری به خمش خالص و سپس خمش کششی تبدیل می‌شود [۴]، نواحی هفت، نه و ده روی نواحی متناظر روی نیمه سمت راست که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، لغزیده و سطوح برشی این ناحیه را بوجود می‌آورد. به عنوان نمونه تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ناحیه هفت در شکل ۲۱ نشان داده شده که حفره‌های مخروطی در راستای عمود بر مسیر شکست کشیده شده است؛ همچنین کاهش لبه‌های برشی در این ناحیه بیانگر کاهش منطقه پلاستیک و در نتیجه کاهش چقرمگی در این ناحیه است [۲۱]. دلیل کاهش چقرمگی، افزایش کرنش فشاری و در نتیجه افزایش کارسختی در این ناحیه است [۴].

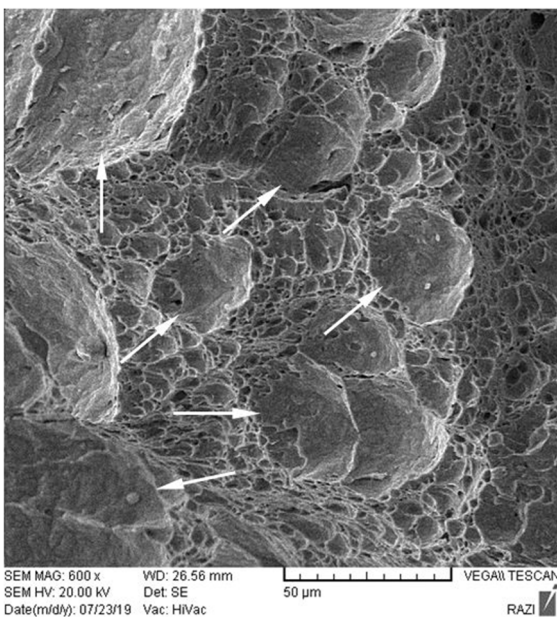
در ۲۸/۹ میلی‌متر انتهای سطح شکست و در ناحیه محل برخورد چکش (ناحیه هشت)، سطح شکست معکوس قرار دارد. در این ناحیه به دلیل کرنش فشاری و اصطکاک تکیه‌گاه‌ها ضخامت نمونه افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند و

^۱ Inclusion

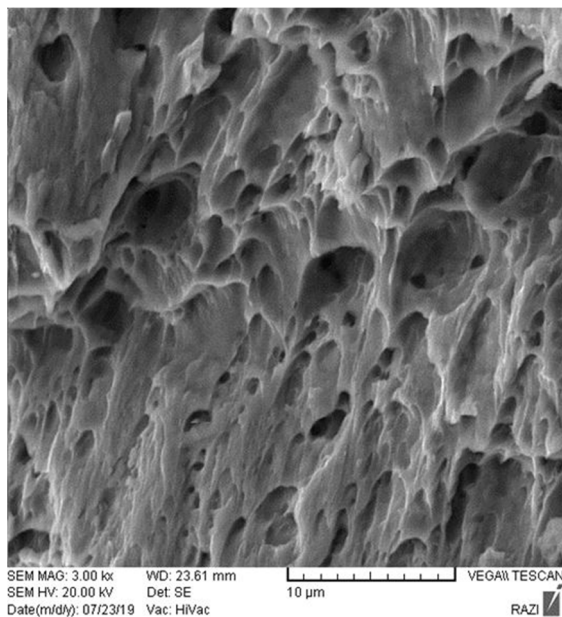
^۲ Cup-Cup Model



شکل ۲۰- سطوح برشی متناظر در دو سطح شکست نمونه آزمایش



شکل ۲۲- رخ‌برگ‌های تورقی در ناحیه شکست معکوس محل برخورد چکش (جهت رشد ترک از راست به چپ است)



شکل ۲۱- کشیدگی حفره‌های مخروطی در ناحیه هفت، عمود بر مسیر رشد ترک (جهت رشد ترک از راست به چپ است)

شکست تورقی معکوس، طبق رابطه ۱ و درصد سطح برشی اصلاح شده با در نظر گرفتن شکست معکوس، طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$SA\% = \frac{(71 - 2t)t - (3/4)ab}{(71 - 2t)t} \times 100 \quad (1)$$

۲-۳- محاسبه درصد سطح شکست برشی
روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری درصد سطح برشی در آزمایش ضربه سقوطی پیشنهاد شده است [۵ و ۱۳]. شکل ۲۳ نحوه محاسبه درصد سطح برشی آزمایش ضربه سقوطی را نشان می‌دهد. درصد سطح برشی بدون در نظر گرفتن

شکست و b' طول شکست ترد در این محدوده است که محدوده‌ی این پارامترها در شکل ۲۴ نشان داده شده است؛ همچنین t ضخامت نمونه است.

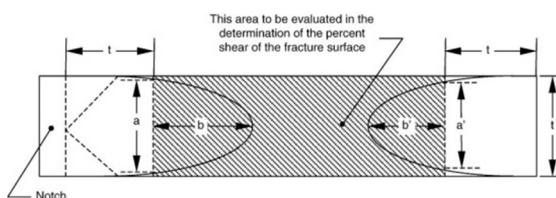
مقادیر a ، b ، a' ، b' و همچنین درصد سطح برشی در جدول ۲ آورده شده است. مقدار پارامتر a بسیار ناچیز است، بنابراین سطح شکست تورقی زیر ریشه شیار در محاسبه درصد سطح شکست برشی تأثیری ندارد.



شکل ۲۴- ناحیه مورد استفاده در محاسبه درصد سطح شکست برشی

$$SA\% = \frac{(71 - 2t)t - (3/4)(ab + a'b')}{(71 - 2t)t} \times 100 \quad (2)$$

در این روابط a عرض شکست ترد در فاصله یک ضخامت نمونه از لبه شیار، b طول شکست ترد در محدوده بین یک ضخامت نمونه از لبه شیار تا یک ضخامت نمونه از محل برخورد چکش با نمونه، a' عرض شکست ترد در محدوده شکست معکوس و با فاصله یک ضخامت نمونه از انتهای



شکل ۲۳- ناحیه محاسبه درصد سطح شکست برشی طبق استاندارد API 5L [۵]

جدول ۲- درصد سطح شکست برشی

پارامترهای محاسبه شده (mm)	درصد سطح شکست برشی بدون احتساب سطح شکست معکوس	درصد سطح شکست برشی با احتساب سطح شکست معکوس	حداقل درصد شکست برشی طبق استاندارد API
$a \approx 0$ $b = 0.2$ $a' = 7.1$ $b' = 14.6$	100	87.1	85

که شامل علائم مختلفی مانند، رخ‌برگ تورقی، علائم شورون ناقص، حفره‌های مخروطی، سطوح کدر و مات و همچنین سطوح براق در نواحی مختلف بود.

۲- شکست با شکست تورقی در ناحیه زیر ریشه شیار شروع شد که این ناحیه به دلیل وجود رخ‌برگ‌ها، شکست تورقی بود و تا ۱۴/۵ میلی‌متر از مسیر شکست امتداد داشت. مساحت این ناحیه، ۴۰ میلی‌متر مربع بود. شکست تورقی در این ناحیه، شرط صحت آزمایش ضربه سقوطی است.

۳- بلافاصله پس از ناحیه تورقی ریشه شیار و در ناحیه فلز پایه، شکست به شکست نرم بامکانیزم تنش صفحه‌ای با زاویه ۴۵ درجه تبدیل گردید. حفره‌های مخروطی متحدالمرکز با اندازه‌های

درصد سطح شکست برشی بدون در نظر گرفتن ناحیه شکست معکوس تقریباً ۱۰۰ درصد و با در نظر گرفتن این ناحیه ۸۷/۱ درصد است. طبق استاندارد API 5L درصد سطح شکست برشی در فولادهای با شکست نرم باید بیشتر از ۸۵ باشد؛ بنابراین فولاد مورد استفاده در این آزمایش چقرمه بوده و برای استفاده در خطوط انتقال گاز مناسب است.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش آزمایش ضربه سقوطی روی نمونه نامتجانس (با درز جوش افقی) از لوله‌ی واقعی از جنس فولاد API X65 برای اولین بار انجام شد و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با نگاه مرئی و میکروسکوپ الکترونی روبشی ده ناحیه مختلف روی سطح شکست مشاهده گردید

۵- تقدیر و تشکر

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به دلیل در اختیار قراردادن لوله فولادی API X65، از مرکز پژوهش‌های رازی به دلیل عکسبرداری الکترونی روبشی از سطح نمونه و از آقای مهندس صادقی (کارگاه مکانیک دانشگاه بیرجند) که در تهیه نمونه و انجام آزمایش همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Standard Test Method for Drop-Weight Tear Tests of Ferritic Steels (2008) ASTM E436-03.
- [2] Sung HK, Sohn SS, Shin SY, Lee S, Kim NJ, Chon SH, Yoo JY (2012) Effects of finish rolling temperature on inverse fracture occurring during drop weight tear test of API X80 pipeline steels. Mater Sci and Eng A. 181-189.
- [3] Yang Z, Kim CB, Feng Y, Cho CH (2008) Abnormal fracture appearance in drop-weight tear test specimens of pipeline steel. Mat Sci Eng A-Struct 483(1): 239-241.
- [4] Yang Z (2014) The fracture during drop-weight tear test of high performance pipeline steel and its abnormal fracture appearance. Proc Mater Sci 3: 1591-1598.
- [5] Hwang B, Lee S, Kim YM, Kim NJ, Yoo JY, Woo ChS (2004) Analysis of abnormal fracture occurring during drop-weight tear test of high-toughness line-pipe Steel. Mat Sci Eng A-Struct 368: 18-27.
- [6] Amano T, Fujishirob T, Shinohara Y, Inoue Y (2016) Evaluation of pre-strain effect on abnormal fracture occurrence in drop-weight tear test for linepipe steel with high charpy energy. Procedia Struc Integ 2: 422-429.
- [7] Kobayashi T, Kim H, Morita S (2001) Progress and development in instrumented charpy impact test. Materialwiss Werkst 32(6): 525-531.
- [8] Fang J, Zhang J, Wang L (2014) Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel from DWTT specimens. Eng Fract Mech 124-125: 18-29.
- [9] El-Danaf E, Baig M, Almajid A, Alshalfan W, Al-Mojil M (2013) Mechanical, microstructure and texture characterization of API X65 steel. Mater Design 47: 529-538.
- [10] Majidi Jirandehi AA, Hashemi SH (2018) Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. Modares Mechanical Engineering 17(11): 219-228.

مختلف در این ناحیه رؤیت گردید. علائم شورون ناقص با زاویه ۴۵ درجه به سمت ریشه شیار ترک دیده شد که فراوانی آنها در ناحیه مرکزی سطح شکست بیشتر بود.

۴- در ناحیه متأثر از حرارت قبل و بعد از ناحیه جوش به دلیل تبلور مجدد ناشی از حرارت جوشکاری، حفره‌های با اندازه‌های کوچک‌تر نسبت به ناحیه فلز پایه رؤیت گردید. در ناحیه متأثر از حرارت قبل از ناحیه جوش، حفره‌ها به صورت متحدالمرکز و در ناحیه بعد از جوش حفره‌های کشیده مشاهده گردید که نشان می‌دهد، مکانیزم شکست از کششی به برشی تغییر پیدا کرده است.

۵- در ناحیه جوش، به دلیل سختی بیشتر و تمایل کمتر به تغییر شکل پلاستیک، حفره‌ها متحدالمرکز بود؛ همچنین به دلیل تبلور مجدد ناشی از حرارت جوشکاری همه حفره‌ها هم‌اندازه بود.

۶- بررسی شکل حفره‌های مخروطی از ابتدای مسیر شکست تا انتها نشان می‌دهد که شکل آنها از حفره‌های متحدالمرکز به حفره‌های کشیده تبدیل می‌شود. این تغییر شکل بیانگر تغییر حالت بارگذاری از کششی به برشی است.

۷- در ۲۸/۹ میلی‌متر انتهای مسیر شکست به دلیل کرنش فشاری ناشی از برخورد چکش و اصطکاک تکیه‌گاه‌ها ناحیه شکست معکوس مشاهده شد که از هر دو طرف توسط سطوح برشی با زاویه ۴۵ درجه احاطه شده بود. به دلیل وجود رخ‌برگ‌ها، سطح شکست در این ناحیه از نوع شکست ترد می‌باشد.

۸- درصد سطح شکست برشی بدون احتساب سطح شکست معکوس ناحیه برخورد چکش تقریباً ۱۰۰ درصد و با احتساب این ناحیه ۸۷/۱ درصد بود که بیشتر از مقدار ذکر شده در استاندارد API 5L است؛ بنابراین فولاد مورد استفاده در این آزمایش چقرمه بوده و برای استفاده در خطوط انتقال گاز مناسب است.

- [17] Sowards J, McCowan CN, Drexler ES (2012) Interpretation and significance of reverse chevron-shaped markings on fracture surfaces of API X100 pipeline steels *Mat Sci Eng A-Struct* 551: 140-148.
- [18] Hashemi SH (2012) Comparative study of fracture appearance in crack tip opening angle testing of gas pipeline steels. *Mat Sci Eng A-Struct* 558: 702-715.
- [19] Hashemi SH, Sedghi S, Soleymani V, Mohammadyani D (2012) CTOA levels of welded joint in API X70 pipe steel. *Eng Frac Mech* 82: 46-59.
- [20] El-Naaman SA, Nielsen KL (2013) Observations on mode I ductile tearing in sheet metals. *Eur J Mech A-Solid* 42: 54-62.
- [21] Hertzberg RW, Vinci RP, Hertzberg JL (2012) *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 5th edn. Wiley, New York.
- [11] Hashemi SH, Mohammadyani D (2012) Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *Int J Pres Ves Pip* 98: 8-15
- [12] Hashemi SH (2011) Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel. *Mat Sci Eng A-Struct* 528: 1648-1655.
- [13] American Petroleum Institute (1996) *API RP 5L3 recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe*. 3rd ed. Washington DC.
- [14] American Petroleum Institute (2013) *API specifications 5L, specifications for line pipe*. 43rd edn.
- [15] Becker WT, Lampman S (2002) *Fracture appearance and mechanisms of deformation and fracture*. Vol 11. ASM Handbook.
- [16] Broek D (1982) *Elementary engineering fracture mechanics*. 3th edn. Kluwer, Boston.