



Investigation of Macroscopic Fracture Surface Characteristics of API X65 Steel Using Three-point Bending Test

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hashemi H.¹ MSc,
Hashemi S.H.^{*2} PhD

How to cite this article

Hashemi H, Hashemi S.H. Investigation of Macroscopic Fracture Surface Characteristics of API X65 Steel Using Three-point Bending Test. Modares Mechanical Engineering, 2019; 19(7):1591-1600.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

²Research Center on Pipeline & Related Industries, University of Birjand, Birjand, Iran

*Correspondence

Address: Research Center on Pipeline & Related Industries, University of Birjand, Birjand, Iran. Postal Code: 9717851367

Phone: -

Fax: +98 (56) 12502142

shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: December 13, 2018

Accepted: March 19, 2019

ePublished: July 01, 2019

ABSTRACT

The API X65 steel (with a minimum yield strength of 65ksi equivalent to 448MPa) is one of the most common types of pipe steels in the transportation of natural gas in Iran. By studying the ductile and brittle fracture areas at the fracture surface of this steel, we can show the quality of this type of steel. In the present study, macroscopic fracture surface characteristics in three-point bending test specimen are studied (based on the geometry and standard notch of drop-weight tear test specimen). Test specimens were machined from an actual steel pipe of API X65 grade with an external diameter of 1219 mm (48 inches) and wall thickness of 14.3 mm. Due to the quasi-static test conditions and speed of the machine's jaw (0.1 mm/s), the test was carried out on base metal specimens with machine chevron notch of 15, 10, and 5.1 mm depth, respectively, that was controlled with changing location. By applying the test load, cracking initiated from the notch root in each specimen and continued without crack specimen (ligament). At the end of the test, test specimens were cooled by liquid nitrogen and were broken in a brittle manner. In this paper, after investigation of the failure mode and the crack expansion in the standard specimen, investigation of macroscopic fracture surface characteristics was conducted by optical microscopy. By observing the fracture surface, different features such as thickness variation, shear regions (ductile fracture), cleavage fracture, shear lips, inverse fracture, and brittle fracture were studied. Having above 85% shear area, the ductile fracture of specimen was confirmed.

Keywords Gas Transportation Pipeline; API X65 Steel; Quasi-Static Three-Point Bending Test Fracture Surface; Inverse Fracture

CITATION LINKS

[1] Modeling and estimation of the natural gas consumption for residential and commercial ... [2] The state of natural ... [3] Strength-hardness statistical correlation ... [4] Mechanical, microstructure and texture ... [5] The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties ... [6] 1.01 - Introduction to Assessing Properties of Conventional and ... [7] Thermo-mechanical processing of metallic ... [8] Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and ... [9] Characterizing dynamic fracture toughness of linepipe steels using the pressed-notch ... [10] Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline ... [11] Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas ... [12] Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the ... [13] Materials science and engineering an ... [14] Analysis of abnormal fracture occurring during drop-weight tear test of high ... [15] The fracture during drop-weight tear test of high performance pipeline steel and its ... [16] Abnormal fracture appearance in drop-weight tear test ... [17] Effects of finish rolling temperature on inverse fracture occurring during drop weight tear ... [18] Evaluation of pre-strain effect on abnormal fracture occurrence in ... [19] Effects of notch shape and specimen thickness on drop-weight ... [20] Characterisation of weldment hardness, impact energy ... [21] API RP 5L3: Recommended practice for conducting drop-weight tear tests ... [22] API Specification 5L/ISO 3183 (Modified), specification for line pipe ... [23] Deformation and fracture mechanics of engineering ... [24] Effects of crack closure on fatigue crack-growth predictions for 2024-T351 ... [25] Observations on mode I ductile tearing in sheet ... [26] Measurement of CTOA of pipe steels using MDCB and ...

بررسی ویژگی‌های مرئی سطح شکست در آزمایش استاتیکی خمش سه‌نقطه‌ای فولاد API X65

حمید هاشمی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سیدحجت هاشمی PhD*

مرکز تحقیقات مطالعات لوله و صنایع وابسته، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

فولاد API X65 (با حداقل تنش تسلیم 60ksi معادل 418 مگاپاسکال) یکی از پرکاربردترین فولادها در لوله‌های پرفشار انتقال گاز طبیعی ایران است. با مطالعه نواحی شکست نرم و ترد در سطح شکست این فولاد می‌توان کیفیت این نوع فولاد را نشان داد. در تحقیق حاضر، ویژگی‌های مرئی سطح شکست در نمونه خمش سه‌نقطه‌ای (مطابق هندسه نمونه استاندارد آزمایش ضربه سقوطی) و با عمق شیار استاندارد بررسی شده است. نمونه‌ها از بدنه لوله فولادی با قطر خارجی 1219 میلی‌متر (48 اینچ) و ضخامت دیواره 4/3 میلی‌متر بریده و تا ابعاد استاندارد ماشین‌کاری شد. با توجه به شرایط شبه‌استاتیک آزمایش و سرعت پایین فک ماشین (0/1 میلی‌متر بر ثانیه)، آزمایش به‌ترتیب روی نمونه‌هایی از جنس فلز پایه با شیار ماشین‌کاری شده و با عمق شیارهای 0/5، 1 و 5/1 میلی‌متر با کنترل تغییر مکان انجام شد. با اعمال بارگذاری، رشد ترک از زیر شیار در هر نمونه شروع شد و در عرض بدون ترک نمونه (لیگامنت) ادامه یافت. در انتهای آزمایش، نمونه‌ها در نیتروژن مایع سرد شده و شکست ترد لیگامنت باقیمانده به‌صورت مکانیکی انجام شد. در این تحقیق پس از بررسی مود شکست و نحوه گسترش ترک در نمونه استاندارد، با مشاهده مرئی کلیه قسمت‌های سطح شکست توسط میکروسکوپ نوری، مواردی از قبیل میزان تغییرات ضخامت، بررسی نواحی برشی (شکست نرم)، شکست ترد اولیه، لبه‌های برشی، شکست معکوس و شکست ترد انتهایی مطالعه و با به‌دست‌آمدن درصد ناحیه شکست برشی بالای 85٪، نرم‌بودن شکست نمونه استاندارد تایید شد.

کلیدواژه‌ها: لوله انتقال گاز، فولاد API X65، آزمایش شبه‌استاتیک خمش سه‌نقطه‌ای، سطح شکست، شکست معکوس

تاریخ دریافت: 1397/02/29

تاریخ پذیرش: 1397/12/28

* نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

رشد مصرف گاز طبیعی بین تمام سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر تاکنون سریع‌ترین بوده است. در 20 سال گذشته، تولید جهانی گاز طبیعی تا حدود 7/7 برابر افزایش یافته است [1]. ایران در میان بیشترین دارندگان ذخایر اثبات‌شده نفت و گاز جهان (رتبه پنجم با داشتن 8/6٪ منابع نفت و رتبه دوم با داشتن 15٪ منابع گاز طبیعی) قرار دارد [2]. افزایش تقاضای گاز طبیعی به‌عنوان انرژی پاک، صنایع را به سمت استفاده از خطوط فولادی با استحکام بالا سوق داده است. از مزایای مشهود استفاده از این خطوط، کاهش در هزینه کلی پروژه در نتیجه کاهش قیمت پایین‌تر لوله به‌دلیل ضخامت کمتر، کاهش هزینه حمل‌ونقل و لوله‌گذاری خط لوله و همچنین کاهش زمان جوشکاری خط لوله است [3]. در صنعت تولید خطوط لوله انتقال انرژی، انتخاب فلز پایه بسیار مهم است و باید مقاومت کششی زیاد همراه با چقرمگی و شکل‌پذیری بالا داشته باشد [4]. این ویژگی جریان دائم انرژی را از طریق خطوط انتقال با امنیت بالا در درازمدت تضمین می‌کند.

۱-۱- فولادهای API و مشخصات آن

یک عامل مؤثر و مهم در استحکام کششی و چقرمگی فلز، فرآیند نورد کنترل‌شده ترمومکانیکال است. پارامترهای مختلف این فرآیند از قبیل دمای اشباع، دمای نورد، دمای نهایی و نرخ سردکردن، نقش بسزایی در میکروساختار و استحکام نهایی فولاد دارد [5]. نرخ

سرعت و دمای توقف سردکردن بیشتر روی تشکیل ریزساختارهای ایجادشده از آستنیت مانند فریت-پرلیت، فریت-بینیت و مارتنسیت تأثیر دارد. میکروساختار فریت-پرلیت در نتیجه خنک‌کاری آرام (خنک‌کاری توسط هوا) به وجود می‌آید و سطح مقاومت تسلیم پایین‌تری ایجاد می‌کند. با افزایش نرخ، خنک‌کاری به سمت میکروساختار بینیت و با مقاومت تسلیم بالاتر سوق داده می‌شود، در حالی که خنک‌کاری سریع تغییر شکل مارتنسیت با مقاومت تسلیم بسیار بالا را به وجود می‌آورد [6].

علاوه بر پارامترهای فرآیند ترمومکانیکال، میکروساختار فولادهای خطوط به‌شدت وابسته به عناصر میکروآلیاژی از جمله منگنز، نیوبیوم، وانادیوم، تیتانیوم، مولیبدن و نیکل است [7]. موسسه نفت آمریکا (API) برای فولادهای خطوط لوله حداکثر نسبت تنش تسلیم به استحکام نهایی را تعیین کرده است (0/93) [4].

به‌منظور حصول اطمینان از استانداردبودن فولاد خط لوله، آزمایش‌های متعددی برای تعیین خواص آن (شامل آزمایش کشش، سختی، ضربه شاری، ضربه سقوطی و آزمایش‌های تعیین چقرمگی شکست) استفاده می‌شود. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، یکی از انواع آزمایش‌های رایج در تعیین چقرمگی شکست نمونه‌های فولادی است [8]. چنانچه نیرو توسط دستگاه در مرکز نمونه به‌آرامی و تحت شرایط بارگذاری با نرخ کرنش پایین اعمال شود، آزمایش در شرایط شبه‌استاتیک انجام می‌شود [9].

با وجود اینکه برای تعیین انرژی شکست عموماً از آزمایش ضربه شاری استفاده می‌شود، اما انرژی حاصل از آزمایش شاری (به‌دلیل ابعاد کوچک نمونه 10×10×55 میلی‌متر) به‌طور کامل نیروی پیشران در ترک و مقاومت در برابر رشد ترک را در دیواره لوله‌ها مشخص نمی‌کند. برخلاف نمونه شاری، در آزمایش ضربه سقوطی، نمونه آزمایش با ابعاد بزرگ‌تر و ضخامت کامل لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد و پیش‌بینی حالت شکست پایدار با ضخامت لوله، پاسخ نسبتاً دقیق‌تری نسبت به آزمایش شاری می‌دهد [9، 10]. بر این اساس در تحقیق حاضر از نمونه‌های بزرگ با ابعاد استاندارد API (مورد استفاده در آزمایش ضربه سقوطی) استفاده می‌شود، با این تفاوت که بارگذاری به‌جای نرخ کرنش بالا (ضربه) در نرخ کرنش پایین صورت می‌گیرد. طی آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای با نرخ کرنش پایین، کنترل شرایط آزمایش به‌صورت بهتری انجام می‌گیرد و همچنین امکان مقایسه رفتار استاتیک و دینامیک فولاد با انجام آزمایش دینامیک وزنه سقوطی و آزمایش استاتیک خمش سه‌نقطه‌ای فراهم می‌شود [11].

۲-۱- بررسی منابع

در تنها تحقیق مشابهی که توسط هری‌مانوج سیمها و همکاران انجام شد، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و ضربه سقوطی روی نمونه استاندارد از فولاد API X70 با درزجوش مستقیم، بریده‌شده از لوله در جهت محیطی با شیار ماشین‌کاری شده طولی (هم‌جهت با محور لوله) صورت گرفت [12]. سرعت بارگذاری 5/1 متر بر ثانیه حین آزمایش ضربه سقوطی و در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای برابر 0/1 متر بر ثانیه بوده است. در آزمایش ضربه سقوطی، شکست برشی مایل مشاهده شد و در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای شبه‌استاتیک شکست در مد اول تنش (شکست مسطح) با کناره‌های موجی شکل بود.

بررسی مکانیزم‌های ایجاد ترک، مکانیزم‌های متفاوت رشد سریع یا در حد بحرانی ترک و رشد آرام و پایین‌تر از رشد بحرانی از اهمیت ویژه صنعتی برخوردار است. بررسی فعل و انفعالات فیزیکی که به‌هنگام شکست روی می‌دهد چندان ساده نیست، زیرا چگونگی

سوانگ و همکاران در تحقیقی به بررسی سطح شکست چهار نمونه آزمایش ضربه سقوطی در دو دمای ۲۰- و ۴۰- درجه سلسیوس پرداخته‌اند [17]. نتایج نشان داده که در دو نمونه با انرژی شکست پایین‌تر در دمای ۲۰- درجه سلسیوس، سطح شکست از چهار قسمت سطح شکست تورقی اولیه زیر نوک شیار، لایه‌لایه‌شدگی شامل لایه‌هایی در جهت رشد ترک جدا یا پاره‌شده، سطح شکست معکوس تورقی ایجادشده در زیر ناحیه برخورد چکش و سطح شکست نرم تشکیل شده است. با پایین آمدن دما، شکست غالب به سطح شکست ورقه‌ای اولیه و شکست معکوس تبدیل شده، اما در دو نمونه دیگر با انرژی شکست بالاتر، شکست نرم در دو دمای آزمایش (۲۰- و ۴۰- درجه سلسیوس) وجود داشته و ناحیه شکست تورقی اولیه و شکست معکوس تقریباً کوچک است. این نتایج بیانگر تأثیر دما و نوع ماده در ترد یا نرم بودن شکست است.

آمانو و همکاران به بررسی سه نوع شیار پرسی، ماشین‌کاری شده و پیش‌ترک استاتیکی با عمق یکسان، روی نمونه‌هایی از جنس فولاد API X65 پرداختند [18]. نتایج نشان‌دهنده وجود کرنش فشاری زیاد در اثر تغییر شکل خمشی، در نمونه‌های با شیار پرسی است. همچنین در این تحقیق به تأثیر نوع شیار به پیدایش سطح شکست غیرطبیعی و سطح شکست برشی پرداخته شده است.

هوانگ و همکاران، نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی از لوله‌های فولادی با چقرمگی بالا را برای تحلیل پدیده شکست غیرطبیعی استخراج کرده‌اند [14]. در این تحقیق دو نوع شیار ماشین‌کاری شده و پرسی به کار برده شده و در بعضی نمونه‌ها شیاری در محل برخورد چکش تعبیه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بعضی از نمونه‌های با شیار پرسی به‌خاطر انرژی بالای اولیه شکست شیار پرسی، شکست برشی در شیار آغاز می‌شود، در حالی که در همه نمونه‌ها با شیار ماشین‌کاری شده، شکست تورقی آغاز می‌شود. ناحیه برخورد چکش در همه نمونه‌ها، پیدایش شکست غیرطبیعی (معکوس) از نوع شکست تورقی را به وجود آورده است. ایجاد شیار پشتی در ناحیه برخورد چکش، سطح شکست معکوس را در هر دو نوع شیار پرسی و ماشین‌کاری شده کاهش داده است.

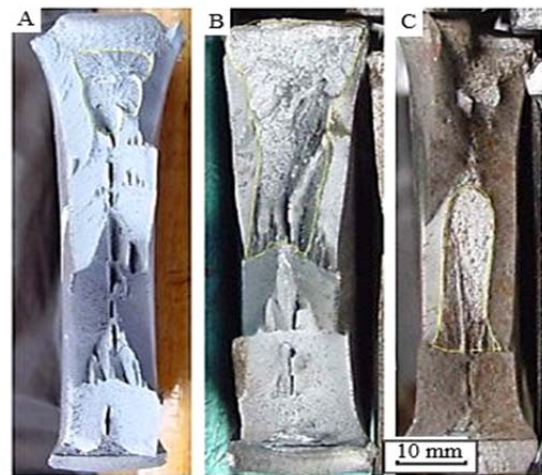
یانگ و همکاران [16] در تحقیقی تأثیر ضخامت و نوع شیار را بر پیدایش متفاوت پدیده شکست غیرطبیعی نمایش داده‌اند. همچنین نشان داده‌اند که با تغییر نوع شیار از شیار پرسی به شیار ماشین‌کاری شده انرژی شکست اساساً می‌تواند کاهش پیدا کند، اما پدیده شکست غیرطبیعی کاملاً از بین نمی‌رود.

در تحقیقی مشابه، شاین و همکاران [19] نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی با دو نوع شیار ماشین‌کاری شده و پرسی در ضخامت‌های گوناگون را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با تغییرات ضخامت نمونه چگالی انرژی در نمونه با شیار ماشین‌کاری شده تغییرات زیادی نداشته، اما این تغییرات در نمونه با شیار پرسی کاملاً محسوس است. دلیل این است که انرژی کل نمونه شیار ماشین‌کاری شده به دلیل وجود تمرکز تنش در آن نسبت به نمونه شیار پرسی کمتر افزایش پیدا می‌کند.

مجیدی‌جیراندی و هاشمی [11] در تحقیقی مشابه به بررسی سطح شکست در نمونه استاندارد آزمایش ضربه سقوطی استخراج شده از درزجوش ماریچ لوله فولاد API X65 با ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر پرداخته‌اند. بارگذاری در شرایط دینامیکی با سرعت چکش ۷ متر بر ثانیه انجام شده است. مسیر شکست کمی بعد از شیار اولیه وارد ناحیه متأثر از حرارت شده و سپس در منطقه ضربه چکش وارد فولاد پایه شده است. قرارگرفتن بیشتر مسیر شکست در ناحیه متأثر از حرارت، نشان از کم‌تر بودن سختی این ناحیه نسبت به دو

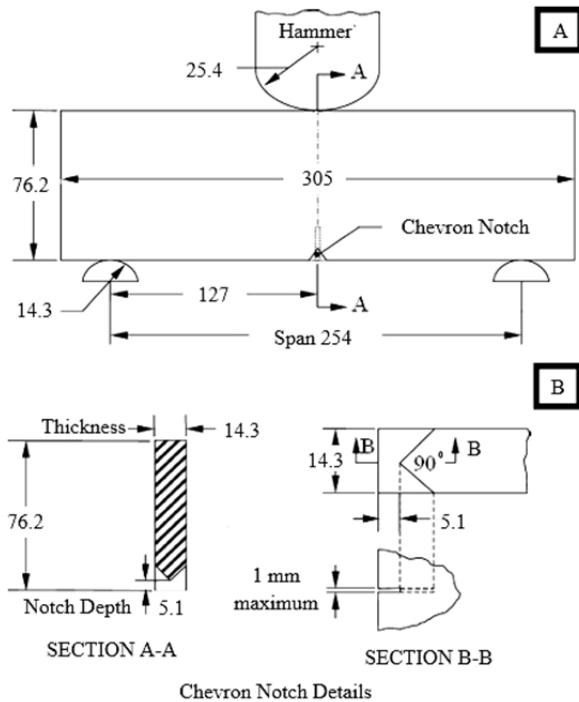
ایجاد ترک و رشد آن و بالاخره نوع شکست در مواد کریستالی به جنس، ساختار شبکه کریستالی، ریزساختار ماده، نوع، اندازه و موقعیت عیوب، نوع و حالت تنش وارد بر آنها بستگی دارد. ماهیت شکست در مواد مختلف تحت تأثیر پارامترهای متعددی نظیر تنش اعمالی، هندسه قطعه، دما و نرخ کرنش است. به‌طور کلی شکست شامل مراحل جوانه‌زنی و رشد ترک بوده و به دو صورت شکست ترد و شکست نرم دیده شده است [13].

اخیراً حین آزمایش ضربه سقوطی روی فولادهای API، علاوه بر سطوح شکست متعارف (قیدشده در استاندارد API)، سطوح شکست غیرطبیعی نیز دیده شده است [14-16]. شروع ترک برشی، شرط لازم برای پیدایش پدیده شکست غیرطبیعی است. سطوح شکست غیرطبیعی نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی براساس سطح شکست تورقی به سه دسته تقسیم می‌شوند. شکست غیرطبیعی نوع اول، در اثر افزایش کرنش فشاری معکوس در محل برخورد چکش و به‌علت فشار معکوس کوپل در خمش نمونه و وجود نیروهای اصطکاکی در سندان‌های آزمایش خمش به وجود می‌آید. این نوع شکست غیرطبیعی، شکست معکوس نیز نامیده می‌شود (شکل ۱- A). استفاده از سندان‌های لغزشی می‌تواند نیروی اصطکاکی نمونه و کرنش معکوس فشاری را کاهش دهد و از شکست غیرطبیعی نوع اول جلوگیری کند. در شکست غیرطبیعی نوع دوم، یک ناحیه شکست ورقه‌ای بزرگ از مرکز تا انتهای سطح شکست اتفاق می‌افتد (شکل ۱- B). مساحت ناحیه شکست ورقه‌ای بزرگ است و ضخامت باقیمانده نمونه به‌وضوح از ضخامت اصلی نمونه بزرگ‌تر است. برای جلوگیری یا کاهش از بروز پدیده این نوع شکست غیرطبیعی، قراردادن یک شیار تیز در نقطه مقابل شیار پرسی استاندارد تعبیه‌شده یا استفاده از شیار ماشین‌کاری شده به‌جای شیار پرسی می‌توان انرژی شکست اولیه و حداکثر بار واردشده متأثر از نیروی چکش و بروز شکست غیرطبیعی نوع دوم را کاهش داد. در شکست غیرطبیعی نوع سوم، شکست ناحیه بزرگی از شکست ورقه‌ای فقط در مرکز سطح شکست اتفاق می‌افتد (شکل ۱- C). ناحیه شکست ورقه‌ای نزدیک به شیار بوده و ضخامت باقیمانده ناحیه شکست از ضخامت اصلی نمونه کوچک‌تر است. این نوع شکست غیرطبیعی در اثر تغییر حالت تنش و اثر دینامیک در طول انتشار ترک به وجود می‌آید و با رفتار شکست ذاتی فلز رابطه دارد. بنابراین با تغییر یا اصلاح نوع شیار نمی‌توان از بروز چنین شکستی جلوگیری کرد.

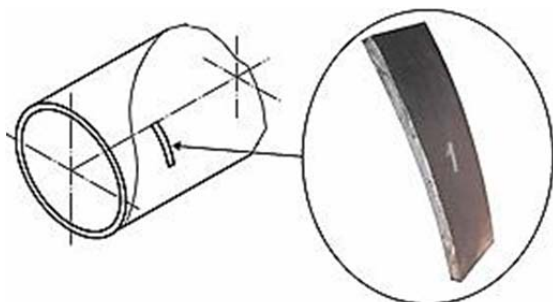


شکل ۱) نمایش شکست غیرطبیعی در نمونه آزمایشگاهی وزنه سقوطی؛ (A) نوع اول، (B) نوع دوم، (C) نوع سوم [15]

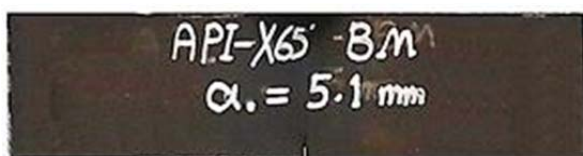
به دلیل انحنای و قطر زیاد (۴۸ اینچ) لوله، مقدار این تنش‌های پسماند ناچیز است. از آنجایی که آزمایش در شرایط شبه‌استاتیک انجام می‌شود و با توجه به خصوصیات انواع شیار در توضیحات بالا، از شیار شورون استفاده می‌شود. عمق شیار نمونه‌ها در این آزمایش برابر با ۵/۱، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر با نسبت شیار به عرض نمونه (۳/۳) به ترتیب برابر با ۰/۰۶۷، ۰/۱۳ و ۰/۱۹ در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵ نمونه آماده فلزپایه با شیار ماشین‌کاری شده و به عمق ۵/۱ میلی‌متر و با ابعاد استاندارد آزمایش ضربه سقوطی را برای آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نمایش می‌دهد.



شکل ۳ ابعاد هندسی نمونه خمش سه‌نقطه‌ای (مطابق استاندارد نمونه ضربه سقوطی) به همراه ابعاد چکش و سندان‌ها، ابعاد شیار شورون (کلیه ابعاد به میلی‌متر) [22]؛ A) ابعاد هندسی نمونه خمش سه‌نقطه‌ای (مطابق استاندارد نمونه ضربه سقوطی) به همراه ابعاد چکش و سندان‌ها، B) ابعاد شیار شورون (کلیه ابعاد به میلی‌متر) [22]



شکل ۴ موقعیت نمونه آزمایشگاهی خمش سه‌نقطه‌ای در لوله واقعی [23]



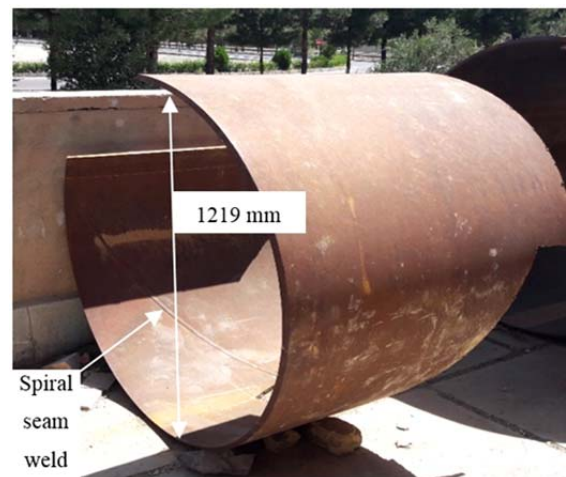
شکل ۵ نمونه فلزپایه با شیار ماشین‌کاری شده به عمق ۵/۱ میلی‌متر

ناحیه جوش و فلز پایه دارد. در این آزمایش، شکست تورقی درست از زیر شیار ماشین‌کاری شروع شده و بلافاصله پس از آن، شکست برشی ادامه پیدا کرده و در انتهای مسیر شکست، پدیده شکست معکوس ایجاد شده است. ضخامت نمونه در ناحیه شکست تورقی، ابتدا کاهش زیادی می‌یابد و پس از آن در ناحیه شکست برشی تقریباً ثابت می‌شود و در ناحیه شکست معکوس، افزایش می‌یابد. مساحت شکست نرم برشی بالای ۹۵٪ نشان از چقرمگی بالای نمونه آزمایش داشته است.

۲- معرفی ماده و روش تحقیق

۲-۱- مشخصات لوله فولادی

لوله استفاده شده در این تحقیق، لوله فولادی با درزجوش مارپیچ (اسپیرال) با قطر خارجی ۱۲۱۹ و ضخامت اسمی ۱۴/۳ میلی‌متر (شکل ۲) بوده و به وسیله جوشکاری زیرپودری تولید شده است. خواص مکانیکی این فولاد (اندازه‌گیری شده در جهت محیطی لوله) و مقایسه خواص با استاندارد API در جدول ۱ نشان داده شده است [20].



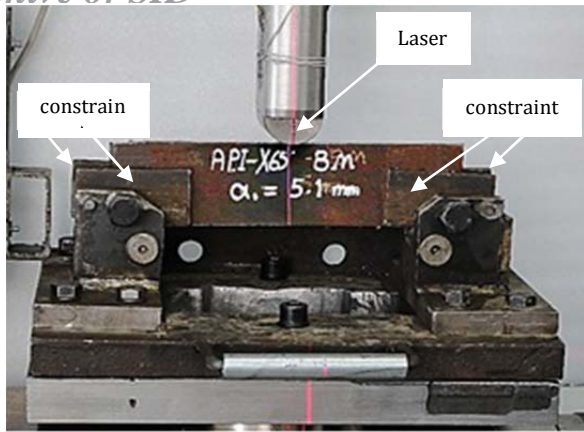
شکل ۲ لوله درزجوش مارپیچ فولادی برای استخراج نمونه آزمایشگاهی

جدول ۱) خواص مکانیکی فولاد API X65 و پارامترهای اندازه‌گیری شده در جهت محیطی لوله [21]

پارامتر	فولاد تحقیق	حد اقل	استاندارد API حداکثر
استحکام تسلیم (MPa)	۴۹۰	۴۴۸	۶۰۰
استحکام نهایی (MPa)	۵۵۲	۵۳۱	۷۵۸
نسبت استحکام تسلیم به استحکام نهایی	۰/۸۹	-	۰/۹۳
حداکثر تغییر طول نسبی (درصد؛ در ۲ اینچ)	۲۱	۱۶	-

۲-۲- هندسه نمونه آزمایشگاهی

ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی از نوع خمش سه‌نقطه‌ای با مشخصات هندسی مطابق استاندارد API (شکل ۳) [21] با عرض، ضخامت و طول ۷۶/۲، ۱۴/۳ و ۳۰۵ میلی‌متر است. ورق فلزی اولیه با ابعاد بزرگتر مطابق استاندارد API 5L [22] در جهت محیطی لوله (شکل ۴) توسط مشعل هوا برش بریده شده و سپس توسط پرس هیدرولیک ۳۰۰ تنی مسطح می‌شود. سپس ناحیه حرارت‌دیده با ماشین‌کاری، حذف و نمونه به ابعاد استاندارد ساخته می‌شود. علی‌رغم ایجاد تنش‌های پسماند ناشی از عملیات غلتک‌کاری و شکل‌دهی لوله، همچنین برآیند مسطح‌کردن مطابق استاندارد API 5L [22]، این تنش‌ها نادیده گرفته می‌شود. در تحقیق حاضر



شکل ۹) استفاده از لیزر و قطعات بلوکی برای هم‌مرکز کردن نمونه و چکش

پس از نصب قید و بند و چکش طراحی شده مطابق استاندارد API RP5L3 [21] روی دستگاه ۶۰۰ کیلو نیوتنی زوئیک، نمونه آماده شده روی قید و بند قرار گرفت (شکل ۸). به منظور حذف خروج از مرکز بین نمونه و نیروی اعمالی ماشین از تراز لیزری و همچنین برای جلوگیری از پیچش احتمالی نمونه در هنگام بارگذاری، دو قید در هر طرف نمونه قرار داده شد (شکل ۹).

۴-۲- انجام آزمایش

بارگذاری در شرایط آزمایشگاهی به صورت شبه‌استاتیکی با سرعت پایین فک‌های ماشین (با سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه) روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شد. از آنجایی که تاکنون آزمایش شبه‌استاتیکی روی نمونه آزمایش ضربه سقوطی به عمق شیار ۵/۱ میلی‌متر انجام نشده است، آزمایش ابتدا روی شیارهای با عمق بیشتر انجام گرفت که در صورت موفقیت در انجام آزمایش، شیار با عمق کمتر مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین آزمایش به ترتیب روی نمونه‌هایی با عمق شیارهای ۱۵، ۱۰، و ۵/۱ میلی‌متر با کنترل تغییر مکان انجام شد. با اعمال تدریجی بارگذاری در شرایط کنترل تغییر مکان، ابتدا دهانه شیار باز می‌شود و پس از مدت زمانی ترک از زیر شیار شروع به رشد می‌کند و در لیگامنت (عرض بدون ترک نمونه) ادامه می‌یابد و در نهایت منجر به خمش نمونه می‌شود (شکل ۱۰). پس از انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در ظرف نیتروژن مایع قرار داده و خنک می‌شوند. سپس با اعمال بار در گیره رومیزی، قسمت باقیمانده از لیگامنت نمونه‌ها به صورت ترد شکسته می‌شود (شکل ۱۱).



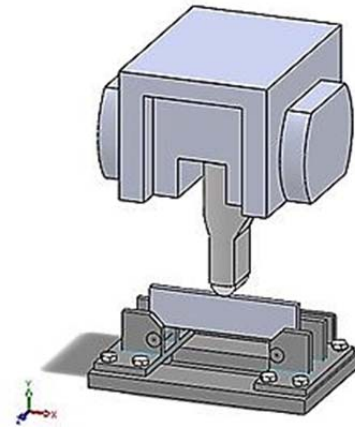
شکل ۱۰) رشد ترک و شکست در نمونه آزمایشگاهی خمش سه‌نقطه‌ای از جنس فلزپایه



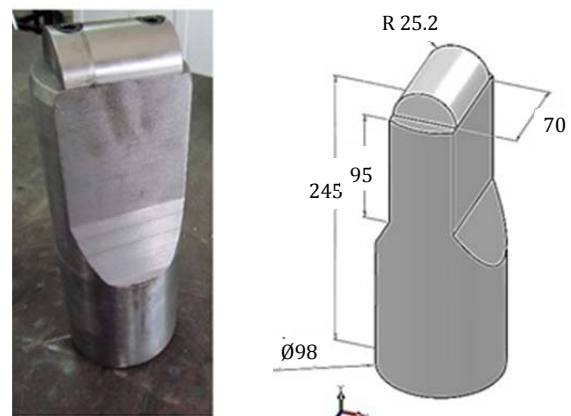
شکل ۱۱) نمونه آزمایشگاهی خمش سه‌نقطه‌ای با شیار اولیه ۵/۱ میلی‌متر پس از شکست لیگامنت در نیتروژن مایع

۳-۲- طراحی قید و بند آزمایشگاهی

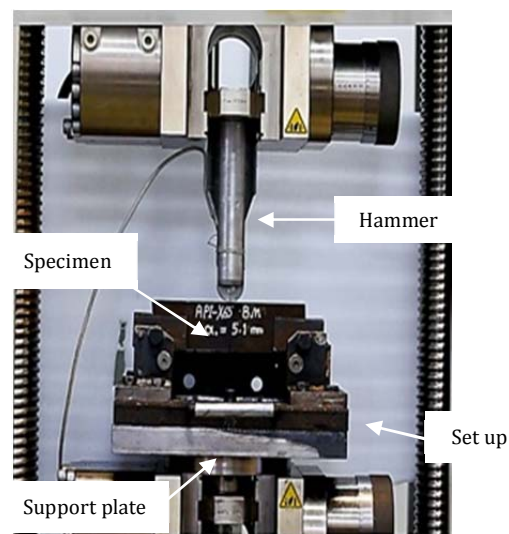
به منظور اعمال نیروی می‌بایست از چکش با شرایط استاندارد آزمایش ضربه سقوطی استفاده شود. از این رو قید و بند و چکش ویژه‌ای برای نصب روی دستگاه آزمایشگاهی استاندارد کشش- فشار زوئیک در نرم‌افزار Solid Works طراحی و ساخته شد (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل ۶) طراحی قید و بند برای آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای روی ماشین استاندارد آزمایشگاهی کشش زوئیک



شکل ۷) هندسه و ساخت چکش برای انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای



شکل ۸) وضعیت نهایی چکش، نمونه، قید و بند و زیرکار ساخته شده روی دستگاه آزمایشگاهی زوئیک

۳- نتایج

همان‌طور که گفته شد، سه آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌هایی از جنس فلز پایه با عمق شیار ۵/۱، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر انجام شد. در این تحقیق به‌دلیل محدودیت صفحات، فقط نتایج نمونه با عمق ترک استاندارد ۵/۱ میلی‌متر ارائه می‌شود (دو نمونه دیگر نیز رفتاری مشابه داشتند).

۳-۱- بررسی ویژگی‌های مرئی سطح شکست

میزان نسبی شکست تخت یا برشی به حالت تنش در مجاورت نوک ترک بستگی دارد. هنگامی که شرایط تنش صفحه‌ای وجود داشته باشد، از آنجایی که احتمالاً شکست در صفحاتی با تنش برشی حداکثر ایجاد می‌شود، اکثراً صفحه شکست نسبت به محور نیرو و ضخامت ورق جهت $\pm 45^\circ$ درجه را به وجود می‌آورد (شکل ۱۲- A) [23]. در شرایط کرنش صفحه‌ای، صفحه شکست میان دو صفحه با تنش برشی حداکثر به وجود می‌آید. احتمالاً این پدیده نشان‌دهنده تمایل ترک به باقی‌ماندن در صفحه‌ای است که بیشترین تنش مقطعی خالص در آن وجود دارد (شکل ۱۲- B) [23].

شکل ۱۳، طرحواره رشد ترک [24] و تصویر واقعی از نمونه گسیخته‌شده آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در زیر شیار (ابتدای شروع ترک) مود شکست به‌دلیل شرایط کرنش صفحه‌ای تخت و از نوع ترد و مثلثی شکل است. این ناحیه تخت و مثلثی شکل به سمت وسط نمونه امتداد می‌یابد. میزان پیشروی قسمت مثلثی، میزان تردبودن فولاد مورد آزمایش را نشان می‌دهد. با رشد ترک، ناحیه پلاستیک نوک ترک در مقایسه با ضخامت نمونه، افزایش می‌یابد و شرایط تنش صفحه‌ای بر نوک ترک حکم‌فرما می‌شود و سبب تغییر مود شکست از نوع تخت به نوع اریب یا برشی می‌شود [23, 24].

شکل ۱۴- A نوارهای برشی حالت شکست برشی را نشان می‌دهد که با یکدیگر زاویه 45° درجه می‌سازند (گسترش ترک به سمت خارج صفحه است). در هنگام اعمال بارگذاری، این نوارهای برشی به‌طور یکسان عمل می‌کنند، به‌دلیل عیوب نامتقارن یک نوار برشی به‌صورت موضعی، جایگزین خواهد شد و شکست اریب را به‌همراه خواهد داشت (شکل ۱۴- B). به‌طور مشابه اگر دو نیمه نوارهای برشی به‌صورت موضعی جایگزین شود، گسترش ترک به‌صورت فنجان- مخروط خواهد بود (شکل ۱۴- C). حالت گسترش ترک به‌صورت فنجان- فنجان، حالت سومی از این حالت شکست است (شکل ۱۴- D) که در رشد ترک نمونه آزمایش تحقیق حاضر ایجاد شده است (شکل ۱۵). این نوع شکست در اثر فعل و انفعالات بین تخلل اولیه، هسته‌های توداخلی، نرخ رشد ترک و فرآیند گلوبی اتفاق می‌افتد [25].

این گسترش ترک با اتفاقات متناوب پیش رو اتفاق می‌افتد. ابتدا در مرکز ضخامت ورق به‌دلیل وجود تنش سه‌بعدی حداکثر، شکل‌گیری موضعی صورت می‌گیرد. سپس یک ترک کوچک شکل می‌گیرد و قبل از اینکه فرآیند جدایش توسط یکی از نوارهای برشی صورت گیرد، مکانیزم شکست نرم (رشد حفره‌ها و به‌هم‌پیوستن آنها) اتفاق می‌افتد. سپس ترک تیز اولیه به سمت صفحات ورق گسترش پیدا می‌کند، در حالی که آن باز شده و به‌عنوان نوک ترک پیش رو به‌شدت کند می‌شود [25].

به‌طور کلی سطح شکست از طرح کلی شکل ۱۶ تبعیت می‌کند. شکست ورقه‌ای از زیر شیار شروع شده (ناحیه a) و پس از رشد ترک تا مسافت خاصی به شکست برشی تبدیل می‌شود (ناحیه b). مجدداً شکست ورقه‌ای در ناحیه شکست معکوس مشاهده می‌شود (ناحیه c) [14].

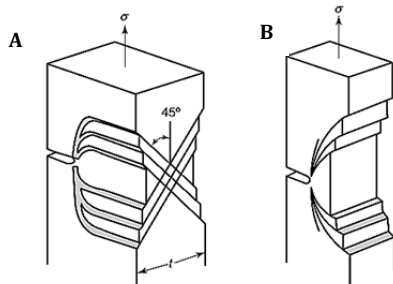
پس از شکست نمونه‌ها در هیدروژن مایع، برای مشاهده سطح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری، نمونه در فاصله ۲۵ میلی‌متری موازی با صفحه رشد ترک بریده شده است. با توجه به محدودیت دید میکروسکوپ، با عکس‌برداری از سطح شکست نمونه در فواصل معین، با قراردادن تصاویر گرفته‌شده در کنار هم و در نرم‌افزار پانوراما میکرو، سطح کلی شکست نمونه‌ها با شیار شورون ۵/۱، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر (شکل ۱۷) قابل مشاهده است. همچنین اندازه‌گیری فواصل و مساحت‌ها با کمک نرم‌افزار Image J صورت گرفته است.

در نمونه استاندارد با شیار شورون ۵/۱ میلی‌متر، شکست ترد اولیه (ناحیه مثلثی روشن و سفید ایجادشده در نزدیکی ریشه ترک اولیه) از ابتدای نوک شیار شروع و تا فاصله ۱۷ میلی‌متر از نوک شیار، ادامه پیدا کرده و مساحتی برابر با ۵۰ میلی‌متر مربع از ضخامت نمونه را در بر می‌گیرد (شکل ۱۸- A). شکست نرم (ناحیه کدر، خاکستری‌رنگ و نرم) به‌دنبال شکست ورقه‌ای می‌آید و سپس تقریباً تمام سطح شکست را شامل می‌شود و در تمام ضخامت نمونه گسترش می‌یابد (شکل ۱۸- A).

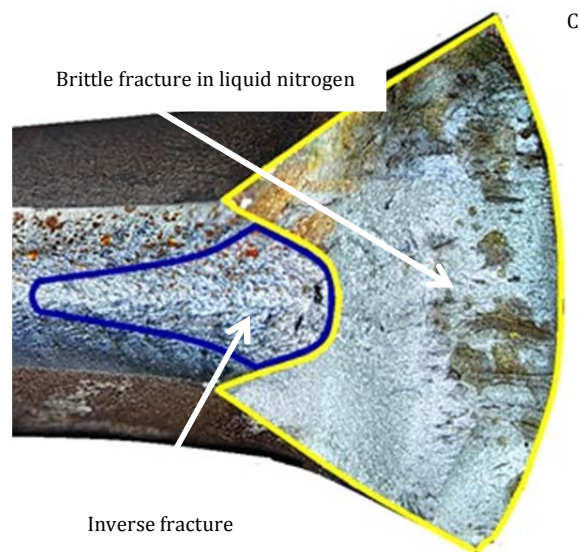
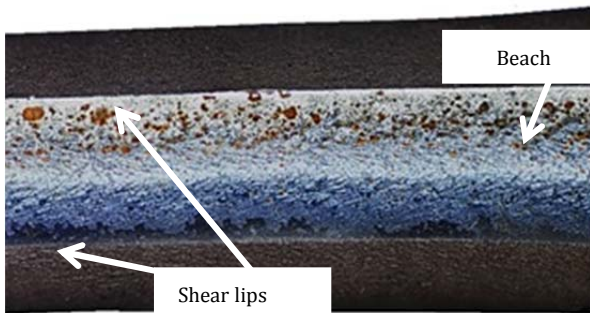
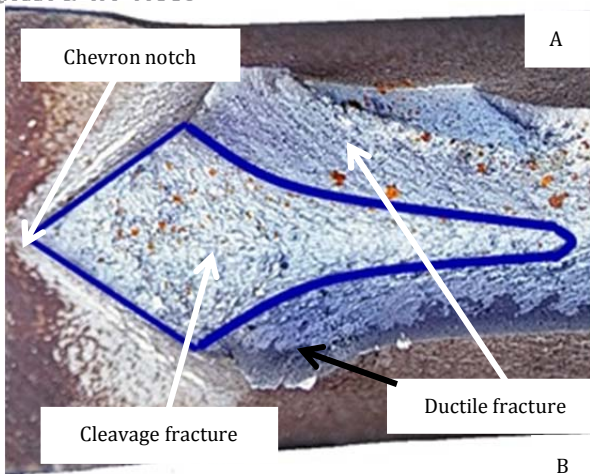
ناحیه انتقال از فاصله ۵ میلی‌متری از نوک شیار شروع می‌شود و در فاصله ۱۷ میلی‌متری از نوک ترک مود شکست از نوع تخت به نوع برشی تغییر پیدا می‌کند. با تغییر نوع، شکست لبه‌های برشی در فاصله ۱۵ میلی‌متر از نوک شیار در نمونه به وجود می‌آید (شکل ۱۸- B). ژرو و همکاران [26] در بررسی سطح شکست نمونه دریافتند که مود شکست در رشد پایدار ترک از نوع برشی و مایل است که این گسترش پایدار ترک با افت خطی مقدار نیرو برحسب جابه‌جایی چکش صورت می‌گیرد. با گسترش ترک نرم در عرض نمونه، خطوطی مایل و دارای انحنا (علائم ساحلی) دیده می‌شود که در وسط ضخامت نمونه به هم می‌رسند و به سمت منشأ ترک بر می‌گردند (شکل ۱۸- B). این خطوط خمیده در اثر رشد رو به عقب جدایش‌های موضعی داخل ماده و برخورد با جبهه در حال پیشرفت ترک به وجود می‌آید [23].

در فاصله ۴۶ میلی‌متری از نوک شیار، شروع شکست معکوس مشاهده می‌شود که این شکست در اثر افزایش کرنش فشاری معکوس در محل برخورد چکش و به‌علت فشار معکوس کوپل در خمش نمونه و وجود نیروهای اصطکاکی در سندان‌های آزمایش خمش به وجود می‌آید [14]. شکست معکوس در ضخامت تقلیل‌یافته نمونه، گسترش پیدا کرده و مساحتی برابر با ۵۰ میلی‌متر مربع را اشغال کرده است (شکل ۱۸- C).

در فاصله ۵۶ میلی‌متری از نوک شیار اولیه، سطح شکست دارای مساحت ۲۴۰ میلی‌متر مربع بوده که در اثر سردکردن نمونه در نیتروژن مایع و شکست ترد متعاقب آن به وجود آمده است (کریستالی بودن سطح شکست بیانگر تردبودن شکست در این ناحیه است؛ شکل ۱۸- C).



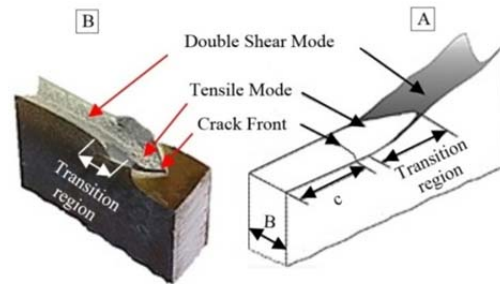
شکل ۱۲) مدل‌های تغییر شکل نوک ترک در وضعیت تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای؛ (A) تنش صفحه‌ای، (B) کرنش صفحه‌ای [24]



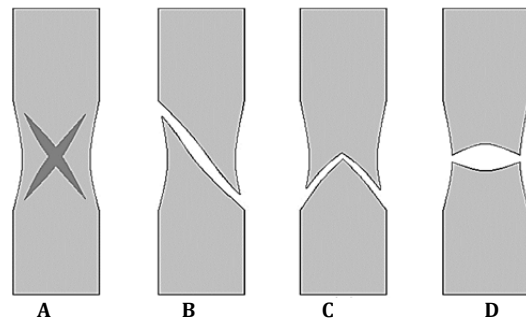
شکل ۱۸) سطح شکست نمونه: (A) ۱۸ میلی‌متر اول سطح شکست، (B) فاصله ۱۸ الی ۴۵ میلی‌متر از نوک شیار، (C) فاصله ۷۶ میلی‌متر از نوک شیار

۲-۳- محاسبه درصد شکست برشی (نرم) در نمونه آزمایشگاهی در شکل ۱۹ نحوه محاسبه درصد ناحیه برشی نشان داده شده است [20]. بر این اساس، درصد ناحیه برشی با احتساب شکست معکوس و درصد ناحیه برشی تصحیح شده بدون احتساب شکست معکوس به ترتیب توسط دو رابطه زیر (براساس استاندارد API) محاسبه می‌شود. در این روابط t ، a و b به ترتیب ضخامت نمونه، عرض شکست ورقه‌ای و طول شکست ورقه‌ای است [21].

$$\text{درصد ناحیه برشی} = \frac{(71-2t)t - \frac{2}{3}(ab+abr)}{(71-2t)t} \times 100 \quad (1)$$



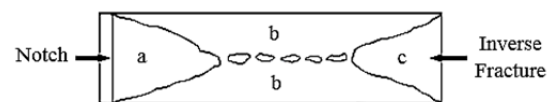
شکل ۱۳) سطح ترک با انتقال از حالت کشش به برشی؛ (A) طرحواره [25]، (B) نمونه گسیخته شده آزمایش خمش سه نقطه‌ای



شکل ۱۴) نمایش الگوی رشد ترک در برش مقطعی نمونه‌ها (برای رشد ترک به سمت خواننده): (A) نمایش نوارهای برشی، (B) رشد ترک مایل (اریب)، (C) رشد ترک فنجان-مخروط (مایل دوگانه)، (D) رشد ترک فنجان- فنجان (وان حمام) [26]



شکل ۱۵) رشد ترک به صورت فنجان- فنجان در نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای

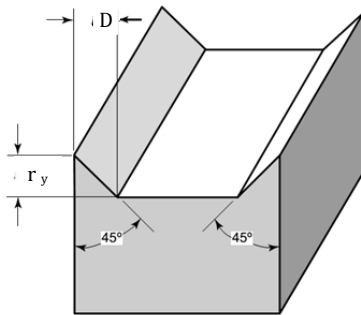


شکل ۱۶) طرحواره سطح شکست نمونه [14]

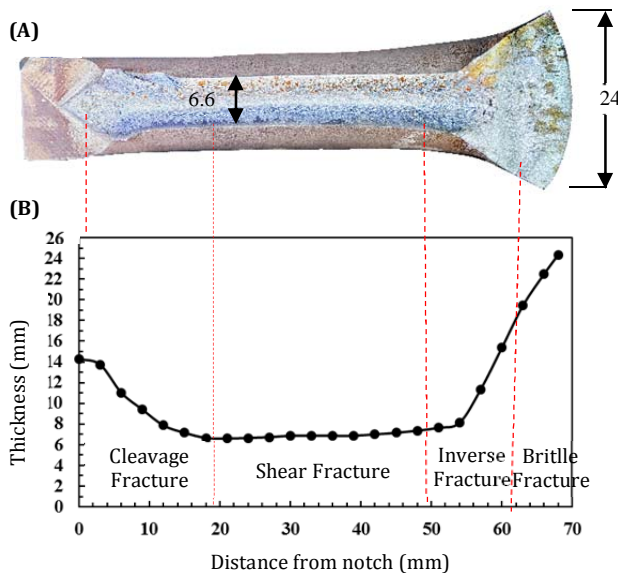


شکل ۱۷) نمای کلی سطح شکست نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای با شیار شورون (A) ۵/۱، (B) ۱۰، (C) ۱۵ میلی‌متر

شکل ۲۲ - A سطح شکست کامل نمونه فلز پایه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، ضخامت نمونه در ابتدای آزمایش ۱۴/۳ میلی‌متر بوده است. با شروع آزمایش و رشد ترک حداقل ضخامت به میزان ۶/۶ میلی‌متر در فاصله ۲۱ میلی‌متری از نوک شیار اولیه ایجاد شده است. همچنین حداکثر ضخامت به میزان ۲۴ میلی‌متر در محل تماس چکش و نمونه دیده می‌شود. تغییرات ضخامت نمونه برحسب فاصله از نوک شیار اولیه در شکل ۲۲ - B نشان داده شده است.



شکل ۲۱) طرح‌های از رابطه بین عمق لبه برشی و اندازه تخمینی ناحیه پلاستیک تنش صفحه‌ای [24]

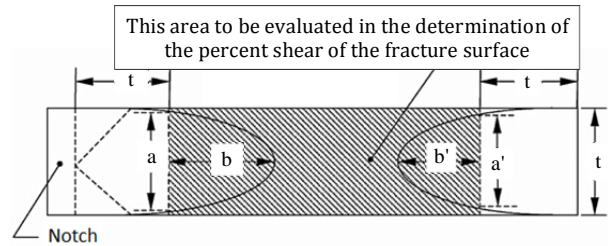


شکل ۲۲) تصویر میکروسکوپ نوری از سطح کامل شکست نمونه آزمایشگاهی خمش سه‌نقطه‌ای با شیار ماشین‌کاری شده به عمق ۵/۱ میلی‌متر و تغییرات ضخامت نمونه برحسب فاصله از نوک شیار اولیه؛ A تصویر میکروسکوپ نوری از سطح کامل شکست نمونه آزمایشگاهی خمش سه‌نقطه‌ای با شیار ماشین‌کاری شده به عمق ۵/۱ میلی‌متر، B تغییرات ضخامت نمونه برحسب فاصله از نوک شیار اولیه

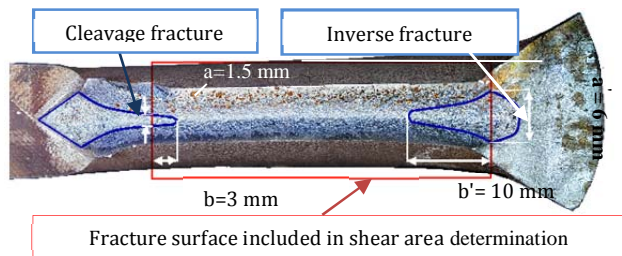
ضخامت نمونه در ۲۴ نقطه و با فواصل ۳ میلی‌متر با دقت یک‌دهم میلی‌متر اندازه‌گیری و در نمودار شکل ۲۲ - B نمایش داده شده است. شروع بارگذاری و گسترش ترک و تغییر حالت شکست از شکست تخت به برشی، تغییرات ضخامت را به همراه خواهد داشت. بیشترین تغییرات ضخامت در ناحیه شکست برشی و حالت تنش صفحه‌ای (با توجه به مطالب فوق در بیشترین اندازه ناحیه پلاستیک ایجاد شده در نوک ترک) ایجاد می‌شود. به‌گونه‌ای که ضخامت نمونه در ناحیه شکست برشی از ۱۴/۳ به ۶/۶ میلی‌متر در فاصله ۲۱ میلی‌متری از نوک شیار کاهش پیدا می‌کند.

$$(۲) \text{ درصد ناحیه برشی تصحیح شده} = \frac{(71-2t)t - \frac{1}{2}ab}{(71-2t)t} \times 100$$

با در نظر گرفتن ضخامت لوله (۱۴/۳ میلی‌متر)، محدوده مناسب محاسبه درصد ناحیه برشی در فلز پایه مطابق شکل ۲۰ است. مقدار متغیرهای روابط ۱ و ۲ و درصد ناحیه برشی محاسبه شده نمونه در جدول ۲ ارائه شده است. در شکست نرم، مقدار درصد ناحیه برشی می‌بایست بالای ۸۵٪ باشد [21]. درصد ناحیه برشی برابر با ۹۲٪ از رابطه ۱ و ۹۹/۴٪ از رابطه ۲، بیانگر نرم بودن شکست است.



شکل ۱۹) سطح شکست ناحیه برشی [21]



شکل ۲۰) درصد ناحیه برشی در نمونه فلز پایه

جدول ۲) پارامترهای سطح شکست نمونه فلز پایه

فلز پایه	نمونه
۵۰	مساحت شکست تورقی اولیه (mm ²)
۲۴۰	مساحت شکست تورقی در نیتروژن مایع (mm ²)
۵۰	مساحت شکست معکوس (mm ²)
۱۰	شروع کناره برشی از نوک شیار (mm)
۶/۶	ضخامت نمونه (mm)
۲۴	حداقل حداکثر
۵۴	حداکثر درصد کاهش ضخامت (انقباض نمونه)
۱/۵	a (mm)
۳	B (mm)
۶	a' (mm)
۱۰	b' (mm)
۹۲	درصد ناحیه برشی
۹۹/۴	درصد ناحیه برشی تصحیح شده

۳-۳- بررسی تغییرات ضخامت نمونه

با توجه به زاویه ۴۵ درجه لبه‌های برشی (شکل ۲۱)، مشاهده می‌شود که شعاع ناحیه پلاستیک (r_y) را می‌توان با عمق لبه‌های برشی تخمین زد. این روش برای فولادهای آلیاژی پراستحکام صادق است [23]. افزایش ناحیه پلاستیک ایجاد شده در هنگام رشد ترک، نشان‌دهنده چقرمگی بیشتر نمونه است. با توجه به قانون حجم ثابت در ناحیه پلاستیک، با افزایش عمق لبه‌های برشی ضخامت نمونه کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش ضخامت نمونه (انقباض نمونه) را می‌توان به‌عنوان معیاری از چقرمگی نمونه در نظر گرفت. لذا کاهش بیشتر ضخامت نمونه (انقباض بیشتر نمونه)، نشان‌دهنده چقرمگی بیشتر نمونه است.

نشان‌دهنده چقرمگی بالای نمونه آزمایش است. همچنین پایین بودن مساحت ناشی از شکست معکوس و تأثیر کم آن در محاسبه درصد شکست برشی، بیانگر این بوده که شیار شورون تأثیر بسزایی در کم شدن مساحت شکست معکوس داشته است.

۹- کمترین و بیشترین ضخامت مقطع به ترتیب ۶/۶ و ۲۴ میلی‌متر و در فاصله ۲۱ (ناحیه شکست تورق) و ۶۸ میلی‌متری (ناحیه تماس چکش با سطح فوقانی نمونه) از نوک شیار بوده است. تغییرات ضخامت در ناحیه شکست برشی تقریباً ثابت است، اما در ناحیه شکست تورقی تغییرات ناگهانی ضخامت وجود دارد.

۱۰- بیشترین تغییرات ضخامت در ناحیه شکست برشی برابر با ۶/۶ میلی‌متر بوده و حداکثر انقباض نمونه ۵۴٪ است و این نشان‌دهنده عمیق بودن لبه‌های برشی نمونه و میزان بالای شعاع ناحیه پلاستیک ایجاد شده در هنگام رشد ترک است و بالابودن چقرمگی نمونه را نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی: از شرکت لوله و تجهیزات سدید (تهران) به لحاظ در اختیار قراردادن لوله فولادی API X65 تقدیر و تشکر می‌شود. از آقای دکتر خزائی در دانشکده علوم دانشگاه بیرجند به لحاظ همکاری در تهیه عکس‌های میکروسکوپ نوری، از آقای دکتر شرفی در دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند به لحاظ همکاری در آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای و از آقای مهندس صادقی که در ساخت قید و بند آزمایشگاهی همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: حمید هاشمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سیدحجت هاشمی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- 1- Forouzanfar M, Doustmohammadi A, Menhaj MB, Hasanazadeh S. Modeling and estimation of the natural gas consumption for residential and commercial sectors in Iran. *Applied Energy*. 2010;87(1):268-274.
- 2- Economides MJ, Wood DA. The state of natural gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2009;1(1-2):1-13.
- 3- Hashemi SH. Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel. *Materials Science and Engineering A*. 2011;528(3):1648-1655.
- 4- El-Danaf E, Baig M, Almajid A, Alshalfan W, Al-Mojil M, Al-Shahrani S. Mechanical, microstructure and texture characterization of API X65 steel. *Materials & Design*. 2013;47:529-538.
- 5- Zhao MC, Yang K, Shan Y. The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel. *Materials Science and Engineering A*. 2002;335(1-2):14-20.
- 6- Van Tyne CJ. 1.01 - Introduction to Assessing Properties of Conventional and Specialized Materials. *Comprehensive Materials Processing*. 2014;1:1-2.
- 7- Verlinden B, Driver J, Samajdar I, Doherty RD. Thermo-mechanical processing of metallic materials. 1st

ضخامت نمونه از شروع ترک تا شروع لبه‌های برشی تقریباً به شکل نامنظمی کاهش پیدا می‌کند. با تغییر حالت شکست از نوع تخت به برشی، تغییرات ضخامت تا قبل از شروع شکست معکوس (فاصله ۴۶ میلی‌متری از نوک شیار) تقریباً ثابت باقی می‌ماند. با گسترش شکست معکوس، ضخامت نمونه به شدت افزایش پیدا می‌کند تا جایی که ضخامت نمونه به ۲۴ میلی‌متر (در انتهای نمونه) می‌رسد. این افزایش ضخامت در اثر فشار ناشی از نیروی چکش به بالای نمونه است. تغییرات ناگهانی ضخامت در هنگام شکست تورقی به وجود می‌آید. در واقع این تغییرات از دلایل تشکیل ناحیه‌های تورقی است. جدول ۲ مقایسه موارد فوق را به صورت کمیته نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

آزمایش خمش سه نقطه‌ای شبه‌استاتیکی با سرعت پایین فک‌های دستگاه، روی نمونه استاندارد فلز پایه استخراج شده از لوله درزجوش ماریپچ فولادی API X65 با عمق شیار ماشین‌کاری شده ۵/۱ و ۱۰ میلی‌متر انجام شد. خلاصه نتایج به دست آمده در این تحقیق برای عمق شیار ۵/۱ میلی‌متر به صورت زیر است:

۱- در سطح مقطع شکست، ویژگی‌های متعددی شامل شکست تورقی، شکست نرم، علائم ساحلی و شکست معکوس مشاهده شد.

۲- شکست تورقی اولیه (ناحیه مثلثی روشن و سفید) از زیر نوک شیار شورون شروع شده و تا فاصله ۱۷ میلی‌متری از نوک شیار ادامه پیدا کرده و مساحتی برابر با ۵۰ میلی‌متر مربع از سطح شکست نمونه را در بر گرفته است. شروع شکست تورقی بلافاصله از زیر نوک شیار، شرط درستی آزمایش مطابق استاندارد است.

۳- پس از شکست تورق اولیه، شکست نرم (ناحیه کدر، خاکستری‌رنگ و نرم) ایجاد و سپس تقریباً تمام سطح شکست را شامل شده و در تمام ضخامت نمونه گسترش می‌یابد. لبه‌های برشی نمونه که نشان‌دهنده تغییر نوع حالت شکست بوده، در فاصله ۱۵ میلی‌متری از نوک شیار شروع شده است. گسترش پایدار ترک که با افت خطی مقدار نیرو برحسب جابه‌جایی چکش همراه است، در مود شکست برشی و مایل اتفاق می‌افتد.

۴- در اثر فعل و انفعالات بین تخلخل اولیه، هسته‌های توداخلی، نرخ رشد ترک و فرآیند گلوپی و گسترش ترک در نمونه به صورت فنجان - فنجان صورت می‌گیرد.

۵- خطوطی مایل و دارای انحنا مشهور به علائم ساحلی با گسترش ترک نرم در عرض نمونه دیده می‌شود که در وسط ضخامت نمونه به هم می‌رسند و به سمت منشأ ترک بر می‌گردند. این خطوط خمیده در اثر رشد رو به عقب جدایش‌های موضعی داخل ماده و برخورد با جبهه در حال پیشرفت ترک به وجود می‌آید.

۶- در اثر افزایش کرنش فشاری معکوس در منطقه برخورد چکش و به علت فشار معکوس کوپل در خمش نمونه و وجود نیروهای اصطکاکی در سندان‌های آزمایش خمش، شکست تورقی (شکست معکوس) در فاصله ۴۶ میلی‌متری از نوک شیار شروع شده و با گسترش در ضخامت تقلیل یافته، مساحتی برابر با ۵۰ میلی‌متر مربع اشغال کرده است.

۷- در انتهای آزمایش، لیگامنت باقیمانده (شکسته شده در نیتروژن مایع) دارای سطح شکست صیقلی که بیانگر ترد بودن شکست در این ناحیه بوده، در فاصله ۵۶ میلی‌متری از نوک شیار و مساحت مربوط به آن ۲۴۰ میلی‌متر مربع است.

۸- درصد شکست برشی با در نظر گرفتن ناحیه شکست معکوس و بدون در نظر گرفتن آن به ترتیب برابر با ۹۲ و ۹۹/۴٪ بوده که

- 18- Amano T, Fujishiro T, Shinohara Y, Inoue T. Evaluation of pre-strain effect on abnormal fracture occurrence in drop-weight tear test for linepipe steel with high charpy energy. *Procedia Structural Integrity*. 2016;2:422-429.
- 19- Shin SY, Hwang B, Lee S, Kang KB. Effects of notch shape and specimen thickness on drop-weight tear test properties of API X70 and X80 line-pipe steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2007;38(3):537-551.
- 20- Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012;98:8-15.
- 21- American Petroleum Institute. API RP 5L3: Recommended practice for conducting drop-weight tear tests on line pipe, fourth edition [Internet]. Washington: API; 2014 [cited 2018 Dec 01]. Available from: https://www.techstreet.com/standards/api-rp-5l3?product_id=1881831
- 22- American Petroleum Institute. API Specification 5L/ISO 3183 (Modified), specification for line pipe, 44th edition [Internet]. Washington: API; 2007 [cited 2018 Dec 01]. Available from: <http://www.shunisteel.com/wp-content/uploads/2013/05/API-5L-2007-Specification-for-Line-Pipe.pdf>
- 23- Hertzberg RW, Vinci RP, Hertzberg JL. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 5th Edition. New York: Wiley; 2012. pp. 336-353.
- 24- Yamada Y, Lacy T, Newman Jr J, Smith BL, Kumar B. Effects of crack closure on fatigue crack-growth predictions for 2024-T351 aluminum alloy panels under spectrum loading. *International Journal of Fatigue*. 2007;29(8):1503-1509.
- 25- El-Naaman SA, Nielsen KL. Observations on mode I ductile tearing in sheet metals. *European Journal of Mechanics A Solids*. 2013;42:54-62.
- 26- Xu S, Tyson WR, Eagleson R, Mc Cowan CN, Drexler ES, Mc Colskey JD, et al. Measurement of CTOA of pipe steels using MDCB and DWTT specimens. *ASME Proceedings Materials and Joining 8th International Pipeline Conference*. 2010;2:IPC2010-31076.
- Editoin. London: Elsevier; 2007. pp. 425-429.
- 8- Zhu XK, Joyce JA. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engineering Fracture Mechanics*. 2012;85:1-46.
- 9- Rudland DL, Wang YY, Wilkowski G, Horsley DJ. Characterizing dynamic fracture toughness of linepipe steels using the pressed-notch drop-weight-tear test specimen. *Engineering Fracture Mechanics*. 2004;71(16-17):2533-2549.
- 10- Fang J, Zhang J, Wang L. Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel from DWTT specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014;124-125:18-29.
- 11- Majidi Jirandehi AA, Hashemi SH. Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(11):219-228. [Persian]
- 12- Hari Manoj Simha C, Xu S, Tyson WR. Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the drop-weight tear test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014;118:62-82.
- 13- Callister WD, Rethwisch DG. *Materials science and engineering an introduction*. 9th Edition. New York: Wiley; 2014. pp. 251-258.
- 14- Hwang B, Lee S, Kim YM, Kim NJ, Yoo JY, Woo CS. Analysis of abnormal fracture occurring during drop-weight tear test of high-toughness line-pipe steel. *Materials Science and Engineering A*. 2004;368(1-2):18-27.
- 15- Yang Z. The fracture during drop-weight tear test of high performance pipeline steel and its abnormal fracture appearance. *Procedia Materials Science*. 2014;3:1591-1598.
- 16- Yang Z, Kim CB, Feng Y, Cho C. Abnormal fracture appearance in drop-weight tear test specimens of pipeline steel. *Materials Science and Engineering A*. 2008;483-484:239-241.
- 17- Sung HK, Sohn SS, Shin SY, Lee S, Kim NJ, Chon SH, et al. Effects of finish rolling temperature on inverse fracture occurring during drop weight tear test of API X80 pipeline steels. *Materials Science and Engineering A*. 2012;541:181-189.