

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2020;20(10):2583-2592

Experimental Study of Fracture Surface Thickness Variations of Inhomogeneous Drop Weight Tear Test Specimen (with Horizontal Weld Seam) Made from API X65 Steel

ARTICLE INFO

Article Type Original Research

Authors Tazimi M.¹ *MSc*, Hashemi S.H. *¹ *PhD*, Rahnama S. ¹ *PhD*

How to cite this article Tazimi M, Hashemi S.H, Rahnama S. Experimental Study of Fracture Surface Thickness Variations of Inhomogeneous Drop Weight Tear Test Specimen (with Horizontal Weld Seam) Made from API X65 Steel. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(10):2583-2592.

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

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran. Postal code: 97175/615 Phone: +98 (56) 32202142 Fax: +98 (56) 32202142 srahnama@birjand.ac.ir

Article History

Received: March 2, 2020 Accepted: August 23, 2020 ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

In this study for the first time, changes in the thickness of the fracture cross-section of the inhomogeneous sample (with horizontal weld seam) of the API X65 steel, using drop weight tear test specimen have been investigated experimentally. The fracture surface of the test specimen consisted of three zones of base metal, heat affected zone and weld metal with different microstructure and mechanical properties. The most thickness reduction was in the cleavage fracture area of the notch root. In the base metal zone, thickness changes were constant which indicated the stable crack growth in this area. In both heat affected zones before and after the weld zone, the thickness changed with a constant slope. Due to the high hardness and low fracture energy of the weld zone, the lowest percentage of thickness changes was in this zone. Thickness in the weld zone increased with a constant slope due to the stretching of the weld zone to the end of the crack growth path by the force caused by the change of fracture mode from tensile to shear. Also in the reverse fracture zone, due to the increased in compressive strain caused by impact of the hammer on the sample, the thickness increases with a significant slope and reached the maximum value.

Keywords Drop Weight Tear Test; Fracture Cross Section Thickness; Inhomogeneous Specimen; API X65 Steel; Gas Transportation Pipelines

CITATION LINKS

[1] Standard test method for drop-weight tear tests of ferritic steels [2] Evaluation of prestrain effect on abnormal fracture occurrence in drop-weight tear test for linepipe steel with high charpy energy [3] Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling [4] Effects of dynamic strain hardening exponent on abnormal cleavage fracture occurring during drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels [5] Effects of finish rolling temperature on inverse fracture occurring during drop weight tear test of API X80 pipeline steels [6] Use of the DWTT energy for predicting ductile fracture behavior in controlled-rolled steel line pipes [7] Experimental measurement and numerical evaluation of fracture energy in drop weight tear test specimen with chevron notch in API X65 steel [8] Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test [9] Experimental investigation of CTOA in linepipe steels [10] On the relationship between shear index and energy in dynamic tear specimens [11] On the relationship between shear lip, shear index and energy in dynamic tear specimens [12] Effect of thickness on the relationship between shear lip and energy in dynamic tear specimens [13] Effects of specimen thickness and notch shape on fracture modes in the drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels [14] Research on brittle fracture of X70/X80 line pipes with big wall thickness at low temperature [15] Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel [16] Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of API X65 steel using three-point bending test [17] API specifications 5L, specifications for line pipe [18] Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel [19] Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel [20] API RP 5L3 recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe [21] Experimental study of fracture surface characteristics of inhomogeneous drop weight tear test specimen made from API X65 steel [22] Elementary engineering fracture mechanics [23] Deformation and fracture mechanics of engineering materials

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تجربی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) در آزمایش ضربه سقوطی فولاد API X65

مصطفی تعظیمی MSc

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

سيدحجت هاشمى^{*} PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران **سعید رهنما PhD**

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

چکیدہ

در این پژوهش برای اولین بار تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) آزمایش ضربه سقوطی فولاد API X65 به روش تجربی بررسی شده است. مقطع شکست نمونه آزمایش شامل سه ناحیه فلز پایه، متاثر از حرارت و جوش با ریزساختار و خواص مکانیکی متفاوت است. بیشترین کاهش ضخامت در ناحیه شکست تورقی ریشه شیار است. در ناحیه فلز پایه تغییرات ضخامت ثابت بوده که بیانگر رشد پایدار ترک در این ناحیه است. در هر دو ناحیه متاثر از حرارت قبل و بعد از ناحیه جوش، ضخامت با شیب ثابت تغییر میکند. بهدلیل سختی بالا و انرژی شکست پایین ناحیه جوش، کمترین درصد تغییرات ضخامت در این ناحیه است. ضخامت در ناحیه جوش، کمترین ثابت افزایش میابد که علت آن کشیدگی ناحیه جوش به سمت انتهای مسیر رشد ترک به وسیله نیروی ناشی از تغییر مود شکست از کششی به برشی است. برخورد چکش با نمونه، ضخامت با شیب قابل توجهی افزایش یافته و به مقدار بیشینه میرسد.

کلیدواژهها: آزمایش ضربه سقوطی، ضخامت مقطع شکست، نمونه نامتجانس، فولاد API X65. لولههای انتقال گاز

> تاریخ دریافت: ۴/۳۹۹٬۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹٬۰۶/۱۷ ^{*}نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

مقدمه

افزایش درخواستهای اخیر در حوزه انرژیهای پاک با آلایندگی کمتر، به توسعه لولههای انتقال گاز طبیعی با ظرفیت انتقال بیشتر منجر شده است. استفاده از فولاد با استحکام و چقرمگی میشود. بهمنظور بررسی چقرمگی شکست لولههای انتقال گاز طبیعی آزمایشهای مختلفی مورد استفاده قرار میگیرد. آزمایش ضربه سقوطی یک آزمایش استاندارد برای بررسی این مقاومت شکست در لولههای انتقال گاز طبیعی است. در این آزمایش بهدلیل اینکه از ابعاد بزرگتری نسبت به آزمایش ضربه شارپی استفاده میشود نتایج شکست از دقت بیشتری برخوردار است. مقطع نمونه برخلاف آزمایش شارپی ضخامت کامل لوله است. همچنین بهدلیل اینکه مسیر شکست دارای طول کافی است، در

فرآیند شکست رشد پایدار ترک مشاهده میشود^[1].

از مهمترین ویژگیهای آزمایش ضربه سقوطی بررسی سطح شکست و متغیرهای مختلف شکست در آن است که در سالهای اخیر توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. در بررسی نواحی مختلف سطح شکست لولههای انتقال گاز طبیعی از دیدگاه ماکروسکوپی و میکروسکوپی، آثار و علایم مختلفی از قبیل حفرههای مخروطی، رخبرگهای تورقی، شورونها (Chevron) و لایهلایهشدن بهمنظور تعیین نوع سطح شکست اعم از شکست نرم، ترد و در نهایت تعیین پقرمگی لوله توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است⁵²⁻²]. همچنین متغیرهای مختلف شکست نمونه از قبیل دمای انتقال شکست نرم به ترد، زاویه بازشدگی دهانه ترک، فاصله بازشدگی دهانه ترک، انتگرال **[**، انرژی شکست و نیروی شکست نیز توسط محققین بررسی شده است⁻⁶]

یکی از متغیرهای مهم در بررسی کیفیت فولادهای مورد استفاده در خطوط انتقال گاز طبیعی، ضخامت نمونه آزمایش ضربه سقوطی میتواند باشد. بهدلیل تفاوت ریزساختارها و همچنین خواص مکانیکی فولادهای مختلف از قبیل تنش تسلیم، تنش کششی، درصد تغییر طول، انرژی شکست و سختی، تغییرات ضخامت مقطع شکست در نمونههای مختلف، متفاوت است. استخراج سایر متغیرهای شکست آزمایش ضربه سقوطی با توجه به استفاده از دستگاههای تجهیزشده و نیروی انسانی متخصص به کرنش سنج یا شتاب سنج، کارت جمعآوری داده اسیلوسکوپ و رایانه لازم است و یا در آزمایش محکم و یا TOD به دوربین سرعت بالا نیاز است). این در حالی است که ضخامت مقطع نمونه یک پارامتر هندسی است که استخراج آن ساده و ارزان قیمت آزمایش ضربه سقوطی مورد استفاده قرار گیرد.

تحقیقات انجامشده بر روی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی بسیار محدود است. در تحقیقات انجامشده، رابطه بین اندازه لبههای برشی سطح شکست (بهعنوان یک معیار هندسی) و انرژی شکست (بهعنوان یک معیار برای هررسی چقرمگی شکست) در فولادهای کمآلیاژ پر استحکام و همچنین ناحیه جوش آنها در آزمایش شکست دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت^[10-12]. مطابق شکل ۱ و نمودار ۱، این رابطه برای هر فولاد بهصورت یک تابع چندجملهای درجه سه بهدست آمد که با افرایش اندازه لبههای برشی انرژی شکست نمونه و در نتیجه چقرمگی آن افزایش مییابد. آزمایش در دماهای مختلف با نمونههای انتخابشده از راستای طولی (L-T) و عرضی (T-L) و از ناحیه فلز پایه، فلز جوش و ناحیه متاثر از حرارت انجام شده است[10-12].



شکل ۱) لبههای برشی (s) در مقطع شکست نمونههای مختلف آزمایش شکست دینامیکی^[11]



نمودار ۱) انرژی شکست به صورت تابعی از اندازه لبه های برشی^[11]

تاثیر تغییرات ضخامت نمونه بر روی پارامترهای شکست آزمایش ضربه سقوطی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش ضخامت نمونه، درصد سطح شکست تورقی ریشه شیار، اندازه و طول سطوح لایهلایه بهدلیل غالبشدن شرایط کرنش صفحهای و همچنین درصد سطح شکست معکوس افزایش پیدا میکند. لبههای برشی در نمونههای با ضخامت کمتر عریضتر هستند^[13]. با افزایش ضخامت نمونه درصد سطح برشی و در نتیجه چقرمگی شکست فولاد کاهش پیدا میکند^[14].

مجیدی و هاشمی^[15]، تغییرات ضخامت مقطع نمونه با درزجوش عمودی آزمایش ضربه سقوطی را بررسی کردند. نمونه مورد استفاده از راستای درزجوش لوله واقعی فولاد API X65 جدا شده، بنابراین مسیر فرضی رشد ترک در راستای درزجوش است که در شکل ۲ مشخص است. تغییرات ضخامت مقطع نمونه در شکل ۳ مشاهده میشود.

منحنی تغییرات ضخامت برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشینکاریشده در نمودار ۲ نشان داده است. همان گونه که مشاهده میشود، ضخامت نمونه در ناحیه شکست تورقی (زیر شیار ماشینکاریشده) کاهش زیادی مییابد و از ۱۴/۳میلیمتر ضخامت اولیه نمونه و دیواره لوله فولادی به ۱۱/۹میلیمتر میرسد. کمترین ضخامت نمونه و دیواره لوله فولادی به ۱۱/۹میلیمتر میرسد. تورقی قرار دارد. پس از آن در ناحیه شکست برشی ضخامت نمونه تقریباً دارای مقدار ثابت و برابر ۱۲/۲میلیمتر است. افزایش

برسی تجربی تغییرات ضخامت منطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افتی) در... ۲۵۸۵ ضخامت نمونه از انتهای ناحیه شکست برشی و با فاصله ۵۵میلیمتر از ابتدای شیار ماشین کاریشده آغاز میشود. فرخامت نمونه اصلی برابر است. افزایش ضخامت با شیب قابل توجهی در ناحیه شکست معکوس (انتهای سطح شکست نمونه) ادامه مییابد. بیشترین ضخامت نمونه شکسته شده آزمایش ضربه سقوطی که در انتهای سطح شکست معکوس قرار دارد، برابر ۸ امیلیمتر است[15].



شکل ۲) نمونه آزمایش ضربه سقوطی با درزجوش عمودی در راستای مسیر رشد ترک



شکل ۳) تغییرات ضخامت سطح شکست نمونه به همراه ابعاد مربوطه برای نمونه با درزجوش عمودی (جهت رشد ترک از چپ به راست و ابعاد به میلیمتر هستند)^[11]



نمودار ۲) منعنی تغییرات صحامت برحسب فاصله از ایندای سیا ماشینکاریشده برای نمونه با درزجوش عمودی^[15]

در پژوهش دیگری تغییرات ضخامت سطح شکست نمونه فولاد پایه API X65 در آزماش خمش سهنقطه مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش مسیر شکست شامل فقط فلز پایه است. شکل ۴ سطح شکست و نمودار ۳ منحنی تغییرات ضخامت آن را نشان میدهند. ضخامت نمونه در ابتدای آزمایش ۱۴/۳میلیمتر بوده است. شروع بارگذاری و گسترش ترک و همچنین تغییر حالت شکست از شکست تخت به برشی، تغییرات ضخامت را به همراه خواهد داشت. حداقل ضخامت برابر با ۶/۶میلیمتر و در فاصله Modares Mechanical Engineering

۲۵۸۶ مصطفی تعظیمی و همکاران ــ

۲۱میلیمتری از نوک شیار اولیه ایجاد شده است. با ادامه رشد ترک و در فواصل ۲۲ تا ۶۳میلیمتر شکست نرم برشی اتفاق افتاده و ضخامت ثابت باقی میماند. سطح شکست در این ناحیه نرم بوده و رشد ترک، پایدار است. همچنین حداکثر ضخامت برابر با ۲۴میلیمتر در ناحیه محل برخورد چکش و نمونه دیده میشود^[16].



شکل ۴) تصویر میکروسکوپ نوری از سطح کامل شکست نمونه آزمایشگاهی خمش سهنقطهای با شیار ماشینکاریشده به عمق ۵/۱میلیمتر از جنس فولاد یایه API X65 [16]



نمودار ۳) منحنی تغییرات ضخامت نمونه برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشینکاریشده^[11]

حرارت ناشی از جوشکاری هنگام تولید لولههای انتقال گاز باعث بهوجودآمدن سه ناحیه مختلف روی لوله میشود که شامل ناحیه فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش است. بهدلیل حرارت ناشی از جوشکاری، خواص مکانیکی و همچنین ریزساختار کریستالی در این سه ناحیه متفاوت است. بهدلیل این تفاوت خواص در نواحی مختلف، ضخامت سطح شکست نیز متفاوت است.

در تحقیقات پیشین نمونه استفادهشده فقط از فلز پایه و یا فقط از ناحیه جوش است. این در حالی است که لولههای انتقال گاز طبیعی با استفاده از روش جوشکاری مارپیچ تولید میشود، بنابراین احتمال رشد ترک در مسیری عمود بر مسیر جوش وجود دارد. در مسیر رشد ترک در راستای عمود بر مسیر جوش، مقطع شکست همزمان شامل سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش است. در تحقیق حاضر برای نخستینبار در بررسی تغییرات ضخامت مقطع شکست آزمایش ضربه سقوطی، نمونهای انتخاب شده است که حاوی درزجوش افقی بوده؛ بنابراین مسیر رشد ترک در راستای عمود بر مسیر جوش است و همزمان هر سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش در مقطع شکست نمونه وجود دارد (شکل ۵).





شکل ۵) نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) آزمایش ضربه سقوطی

مراحل تحقیق و انجام آزمایش نحوه جوشکاری لولهها با درزجوش مارپیچ

جوشکاری در لولههای فولاد X65 API بهصورت روش جوش زیرپودری با حوضچه مذاب Vشکل مطابق استاندارد API 5L زیرپودری با حوضچه مذاب Vشکل مطابق استاندارد $^{[17]}$. از روش جوش زیرپودری الکترود ذوب شده و فلز پایه در زیر یک لایه گداز ذوب می شود. این لایه گداز از فلز مذاب در برابر آلایندهها محافظت میکند و باعث می شود که حرارت در ناحیه اتصال (حوضچه مذاب) متمرکز شود. فلز گداز با جلوگیری از اکسیدشدن فلز مذاب و محافظت از آن در برابر آلایندهها به صورت لایه محافظ سطح فلز جوش را پوشش می دهدا^[81]. جوشکاری در زیرپودری با درصد کربن کم و درصدهای مشخص مولیبدن، هر پاس به وسیله دو مشعل انجام می شود. از چهار سیم جوش زیرپودری با درصد کربن کم و درصدهای مشخص مولیبدن، مینانیوم، بور، مس و نیکل استفاده می شود. در شکل ۶ مشخصات زیرپودری با ماده شده قطعه، زاویه صحیح ابزار و ترتیب جوشکاری نشان داده شده است. پاس اولیه جوشکاری با جریان مستقیم DC نشان داده شده است. پاس اولیه جوشکاری با جریان مستقیم روش

مشخصات ماده نمونه

لوله استفاده شده با قطر خارجی ۱۲۱۹ و ضخامت ۱۴/۳میلی متر از جنس فولاد API X65 است که با جوشکاری مارپیچ تولید می شود. ضخامت درزجوش در قسمت داخلی لوله ۱۶ و در قسمت خارجی لوله ۲۰میلی متر است که در شکل ۷ مشاهده می شود. به منظور دستیابی به استحکام و چقرمگی همزمان بالا، ورق مورد استفاده با فرآیند خنک کاری سریع و نورد کنترل شده ترمومکانیکال تولید می شود^[18].

مقطع نمونه آزمایش شامل فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش است. در شکل ۸ ریزساختار این نواحی نشان داده شده است^[18]. ناحیه جوش درشتدانه با اندازه حدود ۲ تا ۴میکرومتر فریت پرویوتکتوئید (Proeutectoid Ferrite) و فریت فریت پرویوتکتوئید (Widmanstatten Ferrite) دیده میشود (شکلهای ۸- A و ۲- ب). شکلهای ۸- C و ۸- D بهترتیب ناحیه درشتدانه و ریزدانه متاثر از حرارت را نشان میدهد. این ناحیه از بینیت (Bainite)، فریت چندوجهی و فریت سوزنی تشکیل شده بینیت (Bainite)، فریت چندوجهی و فریت سوزنی تشکیل شده جوش، بهدلیل تبلور مجدد ناشی از حرارت جوش است. شکل ۸- E

ریزساختار فلز پایه را نشان میدهد. این ناحیه از بافت یکنواخت ریزدانه فریت سوزنی- بینیت تشکیل شده است.

فریت سوزنی ساختار مناسب جهت افزایش چقرمگی فولاد API است. طبیعت درهم قفلشونده فریت سوزنی با اندازه دانهبندی کوچک آن، بیشترین مقاومت در برابر رشد ترک تورقی را دارد^[18]. خواص مکانیکی این نواحی شامل، استحکام تسلیم، استحکام کششی، نسبت استحکام تسلیم به کششی، درصد تغییر طول، انرژی ضربه شارپی و سختی در نواحی مختلف در جدول ۲ آورده شده است^[18,19].





شکل ٦) نحوه جوشکاری درزجوش مارپیچ لوله؛ الف) زاویه جوشکاری جوش متناوب و مستقیم، ب) آمادهسازی لبه، ج) ترتیب جوشکاری^[18]

(ج)

بررسی تجربی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) در... ۲۵۸۷ جدمار () جزیرات روش جوشکاری در لولههای انتقال گاز طبیعی API X65 [^{118]}

J) =) : (• U) ==.			- 0) (
پارامتر	توضيحات				
ا ندازه لوله (mm)		1719×18/7			
نوع پاس	داخلی	داخلی	خارجى	خارجى	
شماره سيم	یک	٢	یک	٢	
مادہ مصرفی	S ₂ Mo	S ₂ Mo	S ₂ Mo	S ₂ Mo	
قطر سیم (mm)	٣/٢	٣/٢	k	٣/٢	
نوع جريان	DC	AC	DC	AC	
جریان (A)	γ۰۰	٧٠٠	٨٠٠	٨٠٠	
ولتا ژ (V)	۳١	٣٣	٣١	٣٣	
سرعت جوشکاری	١/٢	Y 1/Y 1/Y	١/٢ ١/٢	١/٢	
(m/min)					



شکل ۷) لوله API X65 با درزجوش مارپیچ و نمونه آزمایشگاهی جداشده از آن



شکل ۸) ریزساختار ناحیه جوش، ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه فلز پایه در لوله فولادی آزمایششده^[18]

۲۵۸۸ مصطفی تعظیمی و همکاران ــ

جدول ۲) خواص مکانیکی فولاد API X65 در سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش (تنش در راستای محیطی لوله)^[18, 19]

• .11.		فلز پايه	ناحیه متاثر از حرارت	ناحيه جوش
پرامىر	پارامتر		(حداقل، حداکثر، میانگین)	(حداقل، حداکثر، میانگین)
(MD ₂) [* ***	استاندارد API	697, 647,	-	-
كس تسليم (™۲۵)	اندازهگیری شده	۵۳۸، ۵۸۹، ۴۲۹	-	-
(MDa) ** * ***	استاندارد API	۲۵۸ ،۵۳۱	-	-
دىس دىسى (١٩٢٩)	اندازهگیری شده	574 .577 .QAY	-	۶۳۸ ،۶۷۶ ،۵۴۹
ممح م.۳/ ۱ ۳ م.۳	استاندارد API	৽/ঀ٣	-	-
نىس ئىسىم/ئىس ئىسى	اندازهگیری شده	۷۷/۰، ۶۷/۰، ۶۷/۰	-	-
11. **	استاندارد API	٨	-	-
درصد تغيير طول	اندازهگیری شده	ሥዮ .ሥለ .ሥ₀	-	-
	استاندارد API	48F	19.	180
الرژی شارپی (۱)	اندازهگیری شده	741, 174, 184	184 .111 .100	199 .708 .194
(1.5.) mt	استاندارد API	۳۵۰	-	-
سحتی (ویدرر)	اندازهگیری شده	Y17, X77, 777	414.410.414	۲۳۵ ،۲۳۹ ،۲۳۰

آمادهسازی نمونه

ابعاد نمونه آزمایش ضربه سقوطی با مشخصات هندسی طول، عرض و ضخامت بهترتیب ۳۰۵، ۷۶/۲ و ۱۴/۳میلیمتر مطابق استاندارد API 5L است^[20]. پس از جداکردن نمونه از راستای درزجوش لوله بهکمک دستگاه سنگفرز دستی با حاشیه یک سانتیمتر، بهوسیله پرس انحنای آن گرفته شده و با استفاده از دستگاه برش با آب تا ابعاد استاندارد ماشینکاری شده است. برش فولاد را تغییر نمیدهد. سپس مطابق شکل ۹، با استفاده از دستگاه تخلیه الکتریکی، شیار شورون به عمق ۱/۵میلیمتر در وسط نمونه ایجاد شده است. طبق استاندارد به دلیل اینکه نسبت قطر به ضخامت بیشتر از ۴۰ است، پرس انحنای نمونه تأثیر قابل توجهی در نتایج ندارد.



شکل ۹) الف) شیار شورون به عمق ۵/۱میلیمتر در وسط نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی، ب) مقطع شیار شورون (ابعاد به میلیمتر است)

روش انجام آزمایش

آزمایش بهوسیله دستگاه ضربه سقوطی ساختهشده در دانشگاه بیرجند مطابق شکل ۱۰، با ظرفیت ۳۰۰۰۰ ژول و طبق استاندارد API 5L انجام شد^[20]. مركز شيار نمونه بايد منطبق بر مركز چكش باشد، به همین منظور نمونه به کمک سنجه مخصوص در وسط گیره دستگاه قرار گرفته و پیچهای آن بهکمک گشتاورسنج بسته می شود که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. چکش دستگاه به وزن ۲۰۰ کیلوگرم از ارتفاع ۲متری (فاصله لبه پایین چکش با لبه بالای نمونه) رها شده و سرعت آن در لحظه برخورد ۶/۲۶متر 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 صرف نظر شده و سرعت بهصورت تئوری از رابطه سقوط آزاد محاسبه شده است. بعد از انجام آزمایش و شکستن نمونه، برای اندازهگیری ضخامت مقطع شکست، عکس دیجیتال مقطع به نرمافزار سالیدورکس منتقل شده و در ۳۴ نقطه و با فاصله ۲/۵میلیمتر و با دقت ۱/۰میلیمتر اندازهگیری انجام شده است.



شکل ۱۰) دستگاه آزمایش ضربه سقوطی با ظرفیت ۳۰۰۰۰۰ژول؛ الف) نمایی از دستگاه، ب) اسیلوسکوپ و کارت جمعآوری دادهها



شکل ۱۱) بستن نمونه آزمایش در گیره دستگاه با کمک گشتاورسنج

نتايج

بررسى تغيير ضخامت نمونه

همان گونه که در شکل ۱۲ مشاهده میشود ضخامت نمونه هنگام شکستن، بهدلیل تغییرات بارگذاری و چقرمگی متفاوت نواحی مختلف سطح شکست تغییر میکند. از آنجا که شیار در پایین نمونه قرار دارد و ضربه چکش از بالا وارد میشود، نیروی غالب در نزدیکی محل شیار بهصورت کششی است ولی در ناحیه محل برخورد چکش کرنشهای فشاری وجود دارد^[21].

تغییرات ضخامت و درصد تغییرات ضخامت مقطع شکست برحسب فاصله از ابتدای شیار بهترتیب در نمودارهای ٤ و ٥ نشان داده شده است. همچنین مشخصات نقاط مهم اندازهگیریشده ضخامت نمونه، برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه جوش و ناحیه متاثر از حرارت در جدول ۳ ارایه شده است.



(ب)

شکل ۱۲) الف) مقطع نمونه قبل از شکست، ب) عکسبرداری با میکروسکوپ نوری از تغییرات ضخامت نمونه بعد از شکست (جهت رشد ترک از چپ به راست است)



نمودار ۴) منحنی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی (با درزجوش افقی) برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشینکاریشده



فاصله از ریشه شیار(mm)

نمودار ۵) منحنی درصد تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی (با درزجوش افقی) برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشینکاریشده

جدول ۳) مشخصات نقاط مهم اندازهگیریشده ضخامت سطح شکست نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی (با درزجوش افقی) برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین کاریشده

نوع شکست	فاصله از ابتدای شیار (mm)	درصد تغییرات نسبت به اندازه اولیه	مقدار	بارامتر	ţ
-	-	-	<i>۳۴</i>	ازهگیریشده	نقاط اند
شکست تورقی	٨٠	+07/A	44/2	فلز پايه	بيشترين
شکست نرم	٤٥	-•/Å	۱۷/۹	ناحيه جوش	ضخامت (سس
شکست نرم	٥٠	-1/7	۱۷/۳	متاثر از حرارت	(mm)
شکست تورقی	١٢/٥	-٢٤/١	۱۰/۹	فلز پايه	كمترين
شکست نرم	٣٥	-٣/٤	١٤/٣	ناحيه جوش	ضخامت (سس
شکست نرم	٣٠	-77	۱۱/۲	متاثر از حرارت	(mm)

ابتدای سطح شکست با طول ۱۴/۷۱میلیمتر بهصورت شکست تورقی است (شکل ۱۳). ضخامت در این ناحیه بهدلیل کششیبودن بارگذاری^[21] و تنش صفحهای^[22] بیشترین کاهش را نشان داده و به ۱۰/۹میلیمتر (۲۴/۱ کاهش) میرسد.



شکل ۱۳) نواحی مختلف سطح شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) (جهت رشد ترک از چپ به راست است)

بعد از ناحیه شکست تورقی، شکست وارد ناحیه فلز پایه شده و سطح شکست به شکست نرم برشی با زاویه ۴۵درجه تغییر میکند (شکل ۱۳)^[21]. ناحیه پلاستیک نوک ترک با عمق لبههای برشی رابطه مستقیم دارد.

$$D \approx r_y \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\kappa}{\sigma_{ys}} \right) \tag{1}$$

Volume 20, Issue 10, October 2020

Modares Mechanical Engineering

۲۵۹۰ مصطفی تعظیمی و همکاران ــــ

K ،که در رابطه ۱، D عمق لبه برشی، r_y شعاع ناحیه پلاستیک D ،۱ که در رابطه ا ضریب شدت تنش و σ_{vs} تنش تسلیم ماده است (شکل ۱۴). همچنین با افزایش شعاع ناحیه پلاستیک چقرمگی ماده افزایش مییابد^[23]. در ناحیه فلز پایه کل سطح شکست بهصورت لبه برشی با زاویه ۵ درجه است. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که در این ناحیه چقرمگی بیشتر از بقیه قسمتهای ماده است. بنابراین تغییر ضخامت در این ناحیه نسبت به ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش بیشتر است. در این ناحیه با طول ۱۶ (از فاصله ۱۴ تا ۳۰میلیمتر بر روی نمودار ۴ برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین کاری شده)، ضخامت به ۱۱/۱میلیمتر رسیده که ۲۲% کاهش را نشان میدهد. همچنین تغییرات ضخامت در این ناحیه ثابت بوده که بیانگر رشد پایدار ترک است. رشد پایدار ترک ناحیهای از فرآیند شکست تعریف می شود که مقاومت شکست نرم مستقل از اندازه رشد ترک باشد؛ بهعنوان مثال متغیرهای شکست مانند CTOD، CTOA یا تغییرات نیروی شکست در این ناحیه ثابت باشد^[9].



شکل ۱۴) شماتیک رابطه بین عمق لبههای برشی و اندازه ناحیه پلاستیک ناشی از تنش صفحهای^[23]

از فاصله ۳۰ تا ۲۵ و ۵۰ تا ۵۵میلیمتر برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشینکاریشده، نواحی متاثر از حرارت است. بهدلیل شیب تغییرات دمای ناشی از جوشکاری، ریزساختار و خواص مکانیکی در این ناحیه نسبت به ناحیه فلز پایه و جوش متفاوت است. سختی در این ناحیه از ناحیه فلز پایه و جوش کمتر است. در صورتی که انرژی ضربه شارپی از ناحیه جوش بیشتر بوده ولی از ناحیه فلز پایه کمتر است (جدول ۲). ضخامت در ناحیه متاثر از حرارت قبل از ناحیه جوش نسبت به ناحیه فلز پایه با شیب ثابت افزایش مییابد. همچنین ضخامت در ناحیه متاثر از حرارت بعد از ناحیه جوش کاهش یافته و به ۱۱/۷میلیمتر میرسد که اختلاف بسیار ناچیزی با ناحیه فلز پایه ابتدایی دارد.

از فاصله ۳۵ تا ۵۰میلیمتر از ابتدای شیار ماشینکاریشده ناحیه جوش است. انرژی ضربه شارپی در این ناحیه کمترین مقدار را دارد در حالی که بیشترین سختی سطح شکست در این ناحیه واقع شده است (جدول ۲). بنابراین تمایل به تغییر شکل در این ناحیه نسبت به بقیه نواحی کمتر است. بهعبارت دیگر چون

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

چقرمگی در این ناحیه کمتر و سختی بیشتر است تغییرات ضخامت آن نسبت به نواحی فلز پایه و متاثر از حرارت کمتر است. بررسی میکروسکوپی حفرههای مخروطی سطح شکست نیز نشان میدهد که همه آنها هماندازه و متحدالمرکز است در حالی که این حفرهها در ناحیه فلز پایه کشیده بوده که بیانگر تمایل به تغییر شکل بیشتر در این ناحیه است که در شکل ۱۵ نشان داده شده شکل بیشتر در این ناحیه است که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با تنظیم بهینه پارامترهای جوشکاری موثر در تولید لولههای API نظیر نوع و قطر الکترودها، تعداد پاسها، نوع جریان، شدت جریان، ولتاژ جوشکاری، سرعت جوشکاری، نوع و نرخ جریان گاز پوششدهنده، پیشگرم و پسگرم صفحه میتوان باعث افزایش کیفیت چقرمگی ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش شد^[11].



شکل ۱۵) مقایسه میکروسکوپی سطح شکست نواحی مختلف نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی)؛ الف) ناحیه فلز پایه با حفرههای مخروطی کشیده با اندازههای مختلف، ب) ناحیه متاثر از حرارت با حفرههای مخروطی کشیده و هماندازه، ج) ناحیه جوش با حفرههای مخروطی هماندازه

علت تغییرات جزیی ضخامت در این ناحیه کشیدگی ناحیه جوش به سمت انتهای مسیر رشد ترک بهوسیله نیروی ناشی از تغییر مود شکست از کششی به برشی است که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. کمترین درصد تغییرات ضخامت در ناحیه جوش است. در ۲۸/۲میلیمتر انتهای سطح شکست ناحیه شکست معکوس تورقی وجود دارد. بهدلیل کرنش فشاری در این ناحیه ضخامت با شیب قابل توجهی افزایش پیدا میکند و به مقدار بیشینه شیب قابل توجهی افزایش پیدا میکند و به مقدار بیشینه افزایش ضخامت است. بیشترین تغییرات ضخامت در نواحی شکست تورقی ابتدا و انتها بوده که این تغییرات ضخامت از دلایل تشکیل شکست تورقی است.

مقایسه نتایج ضخامت مقطع نمونه نامجانس (با درزجوش افقی) و نمونه با درزجوش عمودی از فولاد API X65 در جدول ۴ آورده شده است. در نمونه با درزجوش عمودی مسیر شکست ناحیه جوش است که در ادامه مسیر رشد ترک و در ناحیه محل برخورد چکش، وارد ناحیه فلز پایه میشود^[15]. تغییرات ضخامت در هر سه ناحیه شکست تورقی ریشه شیار و ناحیه فلز پایه و شکست معکوس در نمونه نامجانس بیشتر از نمونه با درزجوش عمودی است که علت آن سختی کمتر فلز پایه نسبت به ناحیه جوش، انرژی شکست بیشتر ناحیه فلز پایه (جدول ۲) و تمایل بیشتر آن به تغییر شکل است.



شکل ۱۶) کشیدگی ناحیه جوش به سمت انتهای مسیر شکست

جدول ۴) مقایسه ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) و نمونه با درزجوش عمودی فولاد API X65 (اعداد به میلیمتر هستند)

. ,	0	, 0,	0
درصد اختلاف	<i>مجیدی</i> و <i>هاشمی</i> ^[15]	پژوهش حاضر	پارامتر
-9 /Y	11/9	۱۰/۹	ضخامت شيار
- (/ 1			تورقی ریشه شیار
٥ / ٩	14/4	11/1	ضخامت شكست
-1/1			نرم ناحیه فلز پایه
٦/ ٩/	۱۸	44/2	ضخامت ناحيه
			شکست معکوس

جمعبندى

آزمایش ضربه سقوطی روی نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) از لوله فولادی با جنس API X65 انجام گرفت. با بررسی ضخامت مقطع شکست نتایج زیر حاصل شد:

۱- ضخامت نمونه هنگام شکستن تغییر میکند. در محدوده شکست نرم نمونه، در ناحیه فلز پایه بیشترین تغییرات ضخامت و در ناحیه جوش کمترین تغییرات ضخامت اتفاق میافتد.

۲- در ادامه مسیر رشد ترک و در ناحیه فلز پایه تغییرات ضخامت تقریباً ثابت و برابر با مقدار ۱۱/۱میلیمتر (۲۲% کاهش) است. ضخامت ثابت در این ناحیه بیانگر رشد پایدار ترک است.

۳- در ناحیه متاثر از حرارت قبل و بعد از ناحیه جوش، بهدلیل شیب حرارتی ناشی از جوشکاری تغییرات ضخامت با شیب ثابت بهترتیب افزایش و کاهش میبابد.

۴- در ناحیه جوش بهدلیل سختی بالا و چقرمگی پایینتر نسبت به ناحیه فلز پایه و متاثر از حرارت تمایل به تغییر ضخامت بسیار کمتر است. کمترین درصد تغییرات ضخامت در این ناحیه اتفاق میافتد.

۵- شکل و اندازه حفرههای مخروطی هر سه ناحیه کاملاً متناسب با تغییرات ضخامت در این نواحی است. در ناحیه فلز پایه و ناحیه متاثر از حرارت حفرهها دارای کشیدگی است در حالی که در ناحیه جوش حفرهها متحدالمرکز بوده که بیانگر تمایل کمتر این ناحیه به تغییر شکل است. بهدلیل حرارت ناشی از جوشکاری اندازه حفرههای مخروطی ناحیه فلز پایه و متاثر از حرارت متفاوت است.

۶- علت تغییرات جزیی ضخامت در ناحیه جوش (شیب نمودار در این ناحیه) کشیدگی این ناحیه به سمت انتهای مسیر رشد ترک بهوسیله نیروی ناشی از تغییر مود شکست از کششی به برشی است.

۲- کمترین و بیشترین مقدار ضخامت بهترتیب ۱۰/۹میلیمتر (۱/٬۲۴ کاهش) در ناحیه شکست تورقی ریشه شیار و ۲۲/۶میلیمتر (۵۶/۸ افزایش) در ناحیه شکست معکوس (محل برخورد چکش) است. در واقع تغییرات ناگهانی ضخامت از دلایل تشکیل سطوح تورقی است.

۸- با توجه به تغییرات ضخامت در نواحی مختلف نمونه نامتجانس و ثابتبودن ضخامت در ناحیه رشد پایدار ترک، به نظر میرسد که میتوان ضخامت مقطع نمونه آزمایش ضربه سقوطی را بهعنوان یک پارامتر ساده و ارزان و البته مهم در بررسی چقرمگی شکست فولادهای لولههای انتقال گاز مورد بررسی قرار داد.

۹- ریزساختار و همچنین خواص مکانیکی ناحیه جوش با بقیه نواحی (فلز پایه و ناحیه متاثر از حرارت) در جدول ۲ مقایسه شده است. همچنین با بررسی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس مشخص شد که تغییرات ضخامت در ناحیه جوش نسبت به بقیه نواحی (فلز پایه و ناحیه متاثر از حرارت) کمتر است. همچنین مقایسه تغییرات ضخامت نمونه نامتجانس با

۲۵۹۲ مصطفی تعظیمی و همکاران ـــــ

7- Fathi-Asgarabad E, Hashemi SH. Experimental نمونه با درزجوش عمودی و فلز پایه نشان می دهد که کمترین measurement and numerical evaluation of fracture energy in drop weight tear test specimen with chevron notch in API X65 steel. Modares Mechanical Engineering. 8- Majidi-Jirandehi AA, Hashemi SH. Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test. Materials Research Express. 2018;Unknown

Volume(Issue) & First & Last Pages. 9- Rudland DL, Wilkowski GM, Feng Z, Wang YY, Horsley D, Glover A. Experimental investigation of CTOA in linepipe steels. Engineering Fracture Mechanics. 2003;70(3-4):567-577.

2020;20(5):1145-1156. [Persian]

10- Matthews JR. On the relationship between shear index and energy in dynamic tear specimens. Engineering Fracture Mechanics. 1991;39(1):131-140.

11- Matthews JR. On the relationship between shear lip, shear index and energy in dynamic tear specimens. Engineering Fracture Mechanics. 1996;54(1):11-23.

12- Matthews JR, Hyatt CV, Porter JF, Karisallen KJ. Effect of thickness on the relationship between shear lip and energy in dynamic tear specimens. Engineering Fracture Mechanics. 1998;60(5-6):529-542.

13- Hong S, Shin SY, Lee S, Kim NJ. Effects of specimen thickness and notch shape on fracture modes in the drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels. Metallurgical and Materials Transaction A. 2011;42:2619-2632.

14- Wang HT, Li SL, Luo YL, Wang JQ, Zhang HB, Lin N. Research on brittle fracture of X70/X80 line pipes with big wall thickness at low temperature. Key Engineering Materials. 2019;795:3-8.

15- Majidi AA, Hashemi SH. Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(11):219-228.

16- Hashemi H, Hashemi SH. Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of API X65 steel using three-point bending test. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1591-1600.

17- American petroleum institute. API specifications 5L, specifications for line pipe [Internet]. Washington: American Petroleum Institute; 2013 Unknown Cited & Link.

18- 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.

Hashemi SH. Strength-hardness statistical 19correlation in API X65 steel. Materials Science and Engineering: A. 2011;528(3):1648-1655.

20- American petroleum institute. API RP 5L3 recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe [Internet]. Washington: American Petroleum Institute; 1996 Unknown Cited. Available from: https://standards.globalspec.com/std/9859141/api-rp-513

21- Tazimi M, Hashemi SH. Experimental study of fracture surface characteristics of inhomogeneous drop weight tear test specimen made from API X65 steel. Journal of Solids and Fluids Mechanics. 2020;10(1):77-91. [Persian]

22- Broek D. Elementary engineering fracture mechanics. Berlin: Springer Science & Business Media; 1982.

23- Hertzberg RW, Vinci RP, Hertzberg JL. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. New York: Wiley; 2012.

ضخامت در نمونه نامتجانس از فلز یایه بیشتر و از نمونه با درزجوش عمودی کمتر است. میتوان ارتباط معناداری بین ریزساختار و خواص مکانیکی با تغییرات ضخامت پیدا کرد. بهعبارتی دیگر میتوان گفت در نمونههای با انرژی شکست بیشتر، تغییرات ضخامت مقطع شکست بیشتر است (و برعکس). بنابراین میتوان از ضخامت بهعنوان یک پارامتر در بررسی مقاومت شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی استفاده کرد.

۱۰- کمترین ضخامت در نمونه نامتجانس ۱۰/۹، در نمونه با درزجوش عمودی ۱۱/۹[^{15]} و در نمونه فقط فلز یایه ۶/۶میلیمتر [16] است.

تشکر و قدردانی: از شرکت لوله و تجهیزات سدید بهدلیل در اختیار قراردادن لوله فولادی API X65 و از آقای مهندس *صادقی* (کارگاه مکانیک دانشگاه بیرجند) که در تهیه نمونه و انجام آزمایش همکاری نمودهاند، تشکر و قدردانی میشود.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

سهم نویسندگان: مصطفی تعظیمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/یژوهشگر اصلی/ تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)؛ سیدحجت هاشمی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/یژوهشگر کمکی/ تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰%)؛ سعید رهنما (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/یژوهشگر کمکی/ تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۱۰%). منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

منابع

1- ASTM E436-03. Standard test method for drop-weight tear tests of ferritic steels [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2014 Unknown Cited. Available from: https://www.astm.org/Standards/E436.htm

2- Amanoa T, Fujishirob T, Shinohara Y, Inoue Y. 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.

3- Zhao J, Hu W, Wang X, Kang J, Yuan G, Di H, et al. Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling. Material Science and Engineering: A. 2016;666:214-224.

4- Kang M, Kim H, Lee S, Shin SY. Effects of dynamic strain hardening exponent on abnormal cleavage fracture occurring during drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels. Metallurgical and Materials Transactions A. 2013;45:682-697.

5- 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. Material Science and Engineering: A. 2012;541:181-189.

6- Wilkowski GM, Maxey WA, Eiber RJ. Use of the DWTT energy for predicting ductile fracture behavior in controlled-rolled steel line pipes. Canadian Metallurgical Quarterly. 1980;19(1):59-77.