

تعیین تجربی خواص کششی فولاد میکروآلیاژی گرید API X65

حسین فراهت

استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران

چکیده

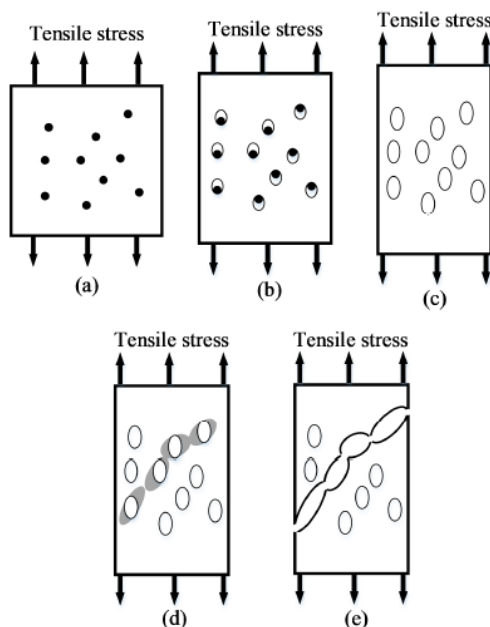
فولاد میکروآلیاژی گرید API X65 به عنوان فولاد عمده در تولید لوله‌های انتقال گاز (با درز جوش مارپیچ) به کار برده می‌شود. در تحقیق حاضر، خواص کششی فولاد API X65 به طور تجربی تعیین شد. مطابق استاندارد ASTM A370-14، نمونه‌های آزمایشگاهی از فلز پایه در جهات طولی و محیطی و از فلز جوش (نمونه‌ای که در مرکز درز جوش قرار دارد) تهیه شد. همچنین به منظور بررسی اثر حالت‌های تنش سه محوری بر خواص کششی ماده، نمونه‌های شیاردار با سه شعاع شیار مختلف ۱/۵، ۳ و ۵ میلی‌متر ساخته شد. آزمون کشش بر روی همه نمونه‌ها با نرخ کرنش 0.002 s^{-1} انجام شد. مقادیر استحکام تسلیم برای فلز پایه در جهات طولی، محیطی و فلز جوش به ترتیب ۵۳۷، ۵۵۴ و ۵۱۸ مگاپاسکال به دست آمد. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های با شیار نشان داد که با کاهش شعاع شیار، استحکام تسلیم و نهایی ماده افزایش می‌یابد، اما کرنش در نقطه شکست و مقدار تغییر طول نمونه کاهش می‌یابد. این رفتار ماده با نتایج گزارش شده توسط سایر محققان مطابقت دارد.

واژگان کلیدی: لوله انتقال گاز، فولاد API X65، درز جوش مارپیچ، آزمون کشش

۱- مقدمه

فولاد گرید API X65 از خانواده فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا^۱ است که حاوی کربن و مقادیر ترکیب میکروآلیاژی (کمتر از ۰/۱ درصد وزنی) مثل تیتانیوم، وانادیوم، نیوبیوم و مولیبدن می باشد و مطابق استاندارد API-5L، به عنوان فولاد عمده در تولید لوله های انتقال انرژی (نفت و گاز) به کار برده می شود. همچنین فرآیند نورد کنترل شده ترمومکانیکی^۲ همراه با خنک کاری سریع در ساخت این فولادها استفاده می شود. این لوله ها با درز جوش مستقیم و مارپیچ بر اساس استاندارد API با قطر خارجی ۵۰۸ تا ۲۰۰۰ میلی متر و با ضخامت جداره ۶ تا ۲۰ میلی متر در طول های ۸ تا ۱۸ متر تولید می شود. توزیع تنش در لوله ها با درز جوش مارپیچ یکنواخت تر از لوله ها با درز جوش مستقیم است؛ زیرا در لوله های با درز جوش مارپیچ، تنش عمودی وارد بر درز جوش به دو مؤلفه طولی و محیطی تجزیه می شود. محققان با انجام آزمون های تجربی کشش، خمش سه نقطه ای و ضربه شاریپی روی نمونه های با شیار در فلز پایه، فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت، چقرمگی شکست و انرژی شکست را در نواحی مختلف لوله فولادی تعیین و با هم مقایسه کردند (آبدیده و همکاران، ۱۳۹۳)، (Herrera et al, 2014)، (Chen et al, 2015)، (Hashemi et al, 2009).

پیش بینی دقیق شکست نرم در فلزات و از جمله در فولاد، همواره یک موضوع اصلی و قابل توجه برای پژوهشگران است. تحقیقات متعددی در این زمینه صورت گرفته است که نتیجه آن ها ارائه مدل های مختلفی از قبیل گرسون^۳ و مارسینیاک-کوزینسکی^۴ می باشد. تجمع عوامل آسیب و نقص، باعث به وجود آمدن ترک یا حفره می شود. تورگارد و نیدلمن رشد ترک را بر پایه معیار گرسون مورد بررسی قرار دادند. آن ها شکست را به صورت نتیجه طبیعی فرآیند تغییر شکل، همراه با جوانه زنی، رشد و به هم پیوستن حفره ها که منجر به تشکیل ریز ترک ها می گردد، مدل سازی نمودند. در "شکل ۱" طرحواره مراحل تشکیل ترک و پارگی در معیار آسیب گرسون - تورگارد و نیدلمن (مدل GTN)^۵ نشان داده شده است (Gurson, 1977)، (Tvergaard, 1982)، (Tvergaard and Needleman, 1984)، (Banabic and Kami, 2018).



شکل ۱- طرحواره رشد حفره و پارگی در یک ورق فلزی نرم (a) ذرات ناخالصی و فاز ثانویه، (b) جوانه زنی حفره ها، (c) رشد حفره ها، (d) ایجاد گلویی بین حفره ها و (e) به هم پیوستن حفره ها و پارگی

¹ High Strength Low Alloy (HSLA)

² Thermo Mechanical Control Processing (TMCP)

³ Gurson

⁴ Marciniak - Kuczyński

⁵ Gurson - Tvergaard - Needleman

برای شبیه سازی شکست در آزمایش کشش فولاد API X65 و تعریف رفتار ماده در ناحیه شکست، از مدل آسیب GTN استفاده می شود. تحقیق حاضر، بخشی از یک کار پژوهشی دنباله دار و با هدف مذکور انجام می گیرد. به این منظور، نمونه های استاندارد آزمون کشش از یک لوله فولادی API X65 استخراج شد. رفتار مکانیکی فولاد API X65 به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت و خواص کششی ماده اندازه گیری شد. با توجه به اینکه ناحیه جوش لوله به دلیل نواقص ذاتی می تواند باعث شروع و رشد ترک و نهایتاً آسیب سازه شود، آزمون کشش روی چند نمونه از فلز جوش لوله API X65 انجام شد و نتایج به دست آمده با نتایج مربوط به فلز پایه مقایسه گردید. همچنین تعدادی نمونه کشش با شیار اولیه در اندازه های مختلف، آزمایش شد و تأثیر اندازه شیار بر رفتار مکانیکی ماده بررسی شد. با ترسیم نمودارهای تنش - کرنش و نیرو - جابجایی برای فلز پایه در جهات طولی و محیطی، فلز جوش و نمونه های با اندازه شیار ۱/۵، ۳ و ۵ میلی متر، مقادیر ویژه تنش و نیرو (تسلیم، حداکثر و شکست) گزارش شد.

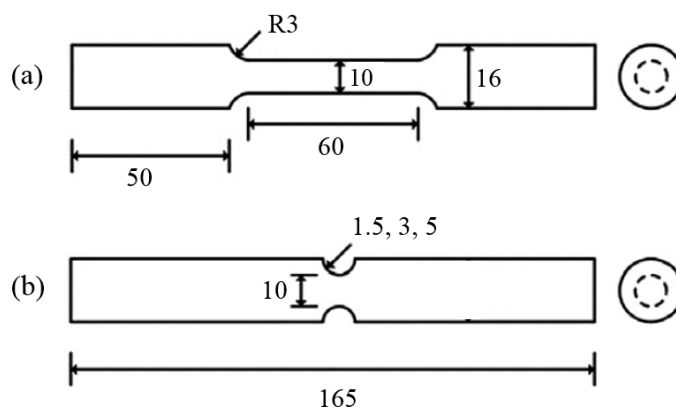
۲- روش تحقیق

۲-۱- معرفی ماده و آزمون کشش

لوله فولادی مورد استفاده، از نوع API X65 با ضخامت دیواره و قطر خارجی ۱۴/۳ و ۱۲۱۹ میلی متر می باشد. جوش این لوله فولادی از نوع مارپیچ زیرپودری است. ترکیب شیمیایی این فولاد عبارت است از (درصد وزنی هر عنصر جلوی آن ذکر شده است): C ۰/۰۷۰، Si ۰/۲۱۰، Mn ۱/۴۵۹، P ۰/۰۰۹، S ۰/۰۰۱، Cr ۰/۱۵۶، Mo ۰/۰۰۱، Ni ۰/۰۱۴، Al ۰/۰۱۵، Cu ۰/۰۴۷، Nb ۰/۰۱۳، Ti ۰/۰۴۶، V ۰/۰۰۲، Ca ۰/۰۰۵، N ۰/۰۰۵ و فلز پایه Fe.

برای تعیین خواص کششی فولاد به کار رفته در لوله (API X65)، نمونه های آزمایش با ابعادی مطابق " شکل ۲ " و بر اساس استاندارد ASTM A370-14 ساخته شد. نمونه های بدون شیار از فلز پایه در جهات طولی و محیطی و از فلز جوش (نمونه ای که در مرکز درز جوش قرار دارد) تهیه شد. همچنین نمونه های شیاردار با شیار ۱/۵، ۳ و ۵ میلی متر آماده سازی گردید. آزمون کشش بر روی همه نمونه ها با نرخ کرنش $s^{-1} \times 10^{-2}$ انجام شد. برای هر کدام از هندسه نمونه ها، آزمایش سه بار تکرار شد. " شکل ۳ " دستگاه آزمایش و نمونه فولادی تحت کشش را نشان می دهد.

جهت طولی و محیطی که در فوق ذکر شد، یعنی این که آزمون کشش بر روی نمونه های مستخرج از فلز پایه به ترتیب در راستای صفر درجه و نود درجه نسبت به جهت غلتک کاری لوله انجام شده است.



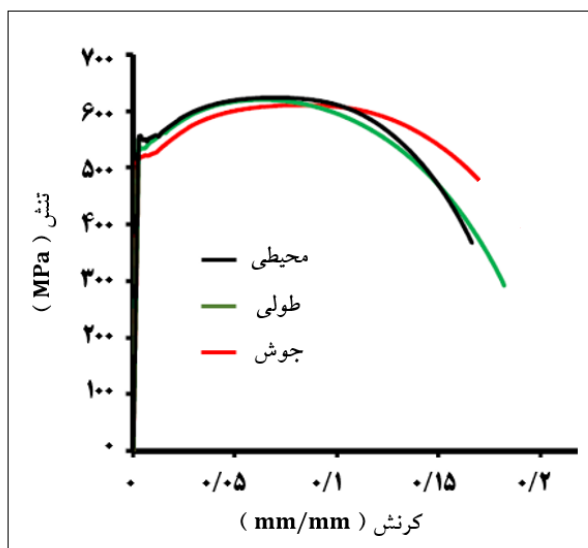
شکل ۲- هندسه نمونه های آزمون کشش: (a) نمونه های بدون شیار، (b) نمونه های شیاردار با اندازه شیار مختلف (کلیه ابعاد به میلی متر می باشد).



شکل ۳- دستگاه تست کشش و نمونه فولادی مورد آزمایش

۳- نتایج و بحث

در "شکل ۴" نمودارهای تنش - کرنش برای نمونه‌های بدون شیار فولادی API X65 نشان داده شده است. راستای نمونه‌های آزمون کشش در جهات طولی، محیطی و راستای درز جوش می‌باشد. خواص کششی اندازه‌گیری شده برای هر کدام از این موارد، در جدول ۱ ارائه شده است. این خواص عبارتند از: استحکام تسلیم ماده، استحکام نهایی، کشامد و مدول یانگ.



شکل ۴ - نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌های فولادی بدون شیار API X65 در جهت طولی، محیطی و فلز جوش

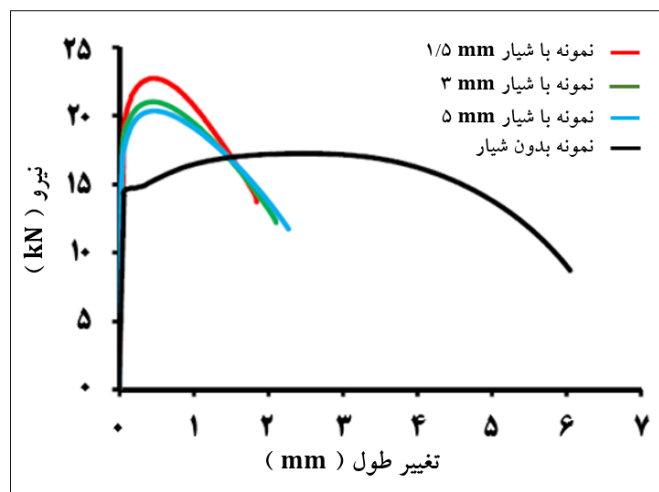
جدول ۱- نتایج به دست آمده از آزمون کشش بر روی نمونه‌های فولادی بدون شیار API X65

راستای نمونه آزمون کشش	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	کشامد (%)	مدول یانگ (GPa)
طولی	۵۳۷	۶۲۱	۱۸/۴	۲۰۷
محیطی	۵۵۴	۶۲۷	۱۶/۸	۲۰۷
درز جوش	۵۱۸	۶۱۳	۱۷/۰	۲۰۹

نتایج نشان می‌دهد که مقدار استحکام تسلیم فولاد API X65 در جهت طولی (۵۳۷ مگاپاسکال) نسبت به جهت محیطی (۵۵۴ مگاپاسکال) کمتر است. با توجه به اینکه لوله فولادی در جهت طولی نورد شده است، لذا کمی تنش پسماند در آن وجود دارد و این امر باعث کاهش استحکام ماده می‌شود. حضور دانه‌های با جهت خاص در ساختار ماده، خواص آن را تا حدی ناهمسانگرد می‌سازد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استحکام تسلیم به‌دست آمده برای فلز جوش (نمونه فولادی که در مرکز درز جوش قرار دارد) به مقدار ۵۱۸ مگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با نمونه‌های مستخرج از فلز پایه در جهات طولی و محیطی کمتر است و این موضوع حائز اهمیت و قابل توجه است. به عنوان مثال، تنش‌های پسماند ناشی از جوش کاری باعث کاهش تنش طراحی در خطوط لوله قطور و پرفشار انتقال گاز طبیعی می‌شود. در مرجع (سبک‌روح و همکاران، ۱۳۹۲) ارتباط ریزساختار فولاد با تنش‌های پسماند در ناحیه جوش خطوط لوله گزارش شده است. عناصر استحکام دهنده میکروآلیاژی در درز جوش نسبت به فولاد پایه کاهش می‌یابد. همچنین میزان درصد کربن در منطقه جوش نسبت به فولاد پایه به شدت افزایش می‌یابد. در منطقه جوش به ویژه در پاس سطح ۷۵ درصد، فاز مارتنزیت تمپر نشده مشاهده شده است. افزایش کربن علاوه بر تردی نسبی، سبب افزایش حجم کریستالی مارتنزیت و در نتیجه کاهش مقاومت ماده می‌گردد. همچنین کاهش استحکام کششی در جوش، باعث افزایش درصد تنش پسماند نسبت به استحکام استاتیکی سازه می‌شود.

مقادیر استحکام نهایی (و کشامد) و ۶۱۳ مگاپاسکال (۱۷/۰ درصد) می‌باشد. (۶۲۷ مگاپاسکال (۱۶/۸ درصد) و ۶۲۱ مگاپاسکال (۱۸/۴ درصد)

"شکل ۵" نمودارهای نیرو - تغییر طول حاصله از آزمون کشش انجام شده بر روی فولاد API X65 برای نمونه بدون شیار و نمونه‌های شیاردار با شیار ۱/۵، ۳ و ۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های شیاردار، با کاهش شعاع شیار نیروی لازم برای تسلیم شدن ماده و استحکام کششی آن افزایش می‌یابد اما مقدار جابجایی یا تغییر طول نمونه (و نیز کرنش شکست) کاهش پیدا می‌کند که دلیل آن، ایجاد تنش سه محوری بالاتر در اثر وجود شیار می‌باشد. نتایج گزارش شده در مرجع (Chang et al, 2023) نیز این موضوع را تأیید می‌کند.



شکل ۵ - نمودار نیرو - تغییر طول برای نمونه‌های شیاردار (با شیار ۱/۵، ۳ و ۵ میلی‌متر) و نمونه بدون شیار

۴- نتیجه گیری

در کار حاضر، آزمون کشش روی نمونه‌های استخراج شده از فلز پایه و فلز جوش از بدنه لوله فولادی API X65 به منظور تعیین تجربی خواص کششی فولاد انجام شد. نمونه‌های مستخرج از فلز پایه در دو راستای صفر درجه (طول) و نود درجه (محیطی) نسبت به جهت غلتک کاری لوله آماده سازی شد. همچنین نمونه‌های گرد شیاردار با شعاع‌های مختلف، تحت آزمون کشش قرار

گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که با کاهش شعاع شیار، استحکام تسلیم و نهایی ماده افزایش می‌یابد. مقادیر استحکام تسلیم در جهت صفر درجه، ۹۰ درجه و در راستای درز جوش به ترتیب برابر ۵۳۷، ۵۵۴ و ۵۱۸ مگاپاسکال است. با توجه به انجام عملیات نورد لوله در جهت صفر درجه و وجود تنش‌های پسماند ناشی از آن، استحکام تسلیم در جهت طولی نسبت به محیطی کمتر است. عناصر استحکام دهنده میکروآلیاژی در درز جوش نسبت به فلز پایه کاهش می‌یابد. همچنین میزان درصد کربن در منطقه جوش افزایش پیدا می‌کند. این عامل، باعث افزایش حجم کریستالی مارتنزیت و در نتیجه کاهش مقاومت ماده می‌گردد.

۵- مراجع

- آبدیده، رضا، محمدزاده شعبه‌گر، ایمان، هیزم‌بر، محمد، آسیابان، امین، بومی‌سازی تولید ورق‌های عریض فولادی رده API-5L X65 در کشور، همایش سمپوزیوم فولاد (دوره هفدهم)، انجمن آهن و فولاد ایران، اسفند ۱۳۹۳
- سبک‌روح، مجید، هاشمی، سید حجت، فراهانی، محمد رضا، ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی با تنش‌های پسماند ناحیه جوش چند پاسه محیطی خطوط لوله ۵۶ اینچ فولادی API X70، مجله پژوهش نفت، دوره ۲۳، شماره ۷۶، ۱۳۹۲، ۶۵-۷۹
- API Specifications 5L (2008). Specification for Line Pipe. 44th edn. In: American petroleum institute.
- Chen, X. Lu, H. Chen, G. Wang, X. (2015). A comparison between fracture toughness at different locations of longitudinal submerged arc welded and spiral submerged arc welded joints of API X80 pipeline steels. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 148. 110-121
- Herrera, D. Hernández, A. Meléndez, R. Velázquez, J. (2014). Fracture toughness in the circumferential–longitudinal and circumferential–radial directions of longitudinal weld API 5L X52 pipeline using standard C(T) and nonstandard curved SE(B) specimens. International Journal of Fracture. Vol. 188. No. 2. 251-256
- Hashemi, SH. Mohammadyani, D. Pournavari, M. Mousavizadeh, SM. (2009). On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. Vol. 32. No. 1. 33-40
- Gurson, A. L. (1977). Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I-Yield criteria and flow rules for porous ductile media. Journal of Engineering Materials and Technology. Vol. 99. No. 1. 2-15
- Tvergaard, V. (1982). On localization in ductile materials containing spherical voids. International Journal of Fracture. Vol. 18. No. 4. 237-252
- Tvergaard, V. Needleman, A. (1984). Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metallurgica. Vol. 32. No. 1. 157-169
- Banabic, D. Kami, A. (2018). Applications of the Gurson's model in sheet metal forming. 5th International Conference on New Forming Technology. Bremen, Germany
- ASTM standard A370-14 (2014). Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. In: Annual book of ASTM standards.
- Chang, O. Kim, N. Kim, Y. Baek, J. Kim, W. (2023). A finite element ductile failure simulation method using stress-modified fracture strain model. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 78. No. 1. 124-137

Experimental study of tensile properties of API X65 microalloyed steel

Hossein Farahat ^{1 *}

Department of Mechanical Engineering, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran

Abstract

API X65 microalloyed steel is a main material used in the manufacturing of gas transmission pipelines with spiral seam weld. In this study, the tensile properties of API X65 steel were measured experimentally. Standard round bar specimens for tensile tests were extracted from an API X65 pipe in the longitudinal and circumferential directions (base metal) and also in the weld metal zone. To investigate the effect of triaxial stress states on tensile properties, notched round bar specimens with three different notch radii, 1.5 mm, 3 mm and 5 mm, were also made. Tensile tests were performed for all specimens with a strain rate of 0.002 S^{-1} . Yield strength levels of 537, 554 and 518 MPa were found for base metal in longitudinal and circumferential directions and weld metal, respectively. Notched bar tests show that, as the notch radius decreases, the yield and tensile strengths increase, but the strain to fracture decreases due to the higher stress triaxialties introduced by the notch. This material behavior is consistent with the results reported by other researchers.

Keywords: Pipe Line Steel, API X65, Spiral Seam Weld, Tensile Test
