



## بررسی ویژگی‌های مرئی سطح شکست درزجوش مارپیچ در لوله فولادی انتقال گاز از نوع API X65

علی اکبر مجیدی جیرندهی<sup>1</sup>، سید حجت هاشمی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، shhashemi@birjand.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 مرداد 1396

پذیرش: 12 مهر 1396

ارائه در سایت: 27 آبان 1396

کلید واژگان:

آزمایش ضربه سقوطی

لوله فولادی انتقال گاز

درزجوش مارپیچ

فولاد API X65

سطح شکست برشی

### چکیده

در سال‌های اخیر شکست‌نگاری نمونه‌های فولادی آزمایش ضربه سقوطی به دلیل پیچیدگی زیاد و دارا بودن ویژگی‌های بسیار متفاوت مورد توجه محققین قرار گرفته است. در تحقیق حاضر برای نخستین بار بررسی ماکروسکوپی (مرئی) سطح شکست نمونه حاوی درزجوش مارپیچ از جنس فولاد API X65 با استفاده از آزمایش ضربه سقوطی انجام شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی حاوی درزجوش در وسط نمونه، از لوله واقعی فولادی با قطر خارجی 1219 میلی‌متر و ضخامت دیواره 14.3 میلی‌متر بریده و تا ابعاد استاندارد ماشین‌کاری شد. سپس شیار اولیه شورون با هندسه V-شکل در وسط درزجوش با عمق شیارهای مختلف (5.1، 10 و 15 میلی‌متر) ایجاد و نمونه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی با سرعت چکش 7 متر بر ثانیه آزمایش شد. شکست‌نگاری نمونه با عمق شیار 5.1 میلی‌متر (معرف رفتار شکست درزجوش) نشان داد ترک به صورت شکست مسطح از نوع تورقی (کلیواژ) در ریشه شیار (محل حداکثر ضربه شدت تنش) آغاز شد. شکست ترد بلافاصله تبدیل به شکست نرم برشی شده و با انحراف به یک سمت نمونه به مقدار زیاد در ناحیه متأثر از حرارت ادامه یافت و سپس در انتهای آزمایش وارد ناحیه فولاد پایه شد. در ناحیه شکست نرم برشی، لایه لایه شدن طولی فولاد تقریباً به موازات مسیر رشد ترک وجود دارد. در منطقه ضربه چکش نیز لبه‌های برشی و شکست معکوس مشاهده می‌شود. با محاسبه مساحت شکست نرم برشی بالای 95 درصد، مطابق روابط موجود در استاندارد مشخص شد این شکست مکانیزم غالب در نمونه آزمایش شده بوده و این فولاد برای کاربرد در لوله‌های پر فشار انتقال گاز طبیعی مناسب است.

## Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel

Ali-Akbar Majidi-Jirandehi, Seyyed Hojjat Hashemi\*

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

\*P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, shhashemi@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 09 August 2017

Accepted 04 October 2017

Available Online 18 November 2017

Keywords:

Drop weight tear test

Gas Transportation pipeline steel

Spiral seam weld

API X65 steel

Shear fracture

### ABSTRACT

Fractography of drop weight tear test (DWTT) specimens has received great attention by researchers in recent years due to the complex fracture surface of this test specimen. In this research, macroscopic characteristics of fracture surface of spiral seam weld in API X65 pipeline steel are investigated for the first time using chevron-notched DWTT specimens. Test specimens were machined from an actual steel pipe of API X65 grade with an outside diameter of 1219mm and wall thickness of 14.3mm. Then chevron notch of 5.1, 10 and 15mm depth was placed in the center of each specimen and test samples were fractured under dynamic loading of 7m/s. Fractography of the fracture surface of test specimen with 5.1mm notch depth (as typical of test samples) showed that cleavage flat fracture initiated from the notch root (where stress intensity factor was high). Cleavage fracture changed immediately to ductile shear fracture, deviated to one side of specimen and grew extensively in heat affected zone, and finally terminated in base metal. Delaminations were observed in shear fracture area almost parallel to crack growth direction. After that, shear lips and inverse fracture appeared in hammer impacted area. By calculating the percent shear area from standard formulations, it was found that test specimen had above 95% shear area, and ductile fracture was the dominant fracture mode implying the fitness of tested steel for application in high-pressure gas transportation pipelines.

### 1- مقدمه

مهمترین انواع آزمایش‌های ضربه در صنعت نفت و گاز می‌باشند. نقص عمده آزمایش ضربه شاری<sup>1</sup> (با نمونه‌ای به ابعاد 55×10×10 میلی‌متر) و آزمایش ضربه سقوطی<sup>2</sup> (با نمونه‌ای به ابعاد ضخامت لوله 305×76 میلی‌متر) از

آزمایش ضربه شاری<sup>1</sup> (با نمونه‌ای به ابعاد 55×10×10 میلی‌متر) و آزمایش ضربه سقوطی<sup>2</sup> (با نمونه‌ای به ابعاد ضخامت لوله 305×76 میلی‌متر) از

<sup>1</sup> Charpy impact test

<sup>2</sup> Drop weight tear test (DWTT)

Please cite this article using:

A. A. Majidi-Jirandehi, S. H. Hashemi, Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 219-228, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سقوطی پرداختند، عنوان شده است که لایه لایه شدن<sup>7</sup> تاثیر کمی بر ایجاد شکست نرم دارد [10].

با بررسی منابع موجود مشخص شد در تمامی تحقیقات مرتبط با آزمایش ضربه سقوطی فولادهای API در صنایع نفت و گاز تاکنون فقط ویژگی‌های سطح شکست فلز پایه بررسی شده و پژوهشی در ارتباط با مشخصات سطح شکست فلز جوش گزارش نشده است. در تحقیق حاضر برای نخستین بار سطح شکست ماکروسکوپی (مرئی) نمونه آزمایش ضربه سقوطی حاوی درزجوش مارپیچ از جنس فولاد API X65 با شیار ماشین‌کاری شده به عمق 5.1 میلی‌متر بررسی شده است. سطح شکست نمونه‌های حاوی درزجوش با شیار پرسی و شیار ماشین‌کاری شده با عمق شیارهای متفاوت (5.1، 10 و 15 میلی‌متر) نیز در آزمایش‌های جداگانه بررسی شده است که در ادامه این تحقیق ارائه خواهد شد.

## 2- معرفی ماده و روش تحقیق

فولاد مورد استفاده در این تحقیق از نوع API X65 است که مشخصات مربوط به آن، توسط موسسه بین‌المللی نفت آمریکا<sup>8</sup> استاندارد شده است [5,4]. ویژگی بارز این فولاد دارا بودن استحکام و چقرمگی بالا و قابلیت جوش-پذیری خوب است [7,4]. استحکام تسلیم<sup>9</sup> و استحکام کششی<sup>10</sup> این فولاد در جهت محیطی لوله به ترتیب 490 و 552 مگاپاسکال است [11].

این فولاد با دو ریزساختار فریت-پرلیتی یا فریت سوزنی-باینیتی تولید می‌شود که ساختار دوم، به دلیل ترکیب بهتر استحکام و چقرمگی، مقاومت بیشتر در برابر خوردگی و همچنین جوش‌پذیری عالی در خطوط انتقال انرژی، ارجحیت دارد. ترکیب ویژگی‌های مذکور اجازه می‌دهد این نوع فولاد در ساخت لوله‌های با قطر زیاد جهت استفاده در خطوط انتقال نفت و گاز در مناطق سردسیر کاربرد داشته باشد [12].

ریزساختار سه ناحیه مذاب، ناحیه متأثر از حرارت<sup>11</sup> و فلز پایه فولاد API X65 در "شکل 1" نشان داده شده است [11]. ناحیه مذاب طی فرآیند جوش‌کاری ذوب شده و دوباره منجمد می‌شود. طی عملیات جوشکاری، تحولات ریزساختاری و تحولات فازی روی می‌دهد. ریز ساختار جوش در این ناحیه از دانه‌های درشت تشکیل شده است. همان‌گونه که در "شکل 1" مشاهده می‌شود در این ناحیه اندازه دانه حدود 2 الی 4 میلی‌متر می‌باشد. ریز ساختار این ناحیه به‌طور عمده از فریت سوزنی<sup>12</sup> و فازهای مرزدانه‌ای شامل فریت ویدمنشتاتن<sup>13</sup> و پری‌یوتکتوئید<sup>14</sup> تشکیل شده است [11].

ناحیه متأثر از حرارت ذوب نمی‌شود، اما خواص آن به علت گرمای شدید حاصل از ناحیه مذاب تغییر کرده و استحاله فازی در آن ایجاد می‌شود. نواحی متأثر از حرارات درشت دانه و ریزدانه به ترتیب در "شکل‌های 1-C و 1-D" نشان داده شده است. این نواحی از باینیت<sup>15</sup>، فریت چندوجهی<sup>16</sup> و فریت سوزنی تشکیل شده است. اندازه دانه در ناحیه متأثر از حرارات به تدریج با دور شدن از ناحیه مذاب تغییر می‌کند [11]. ناحیه فلز پایه از فرآیند جوش‌کاری تاثیر نپذیرفته است. همان‌گونه که در "شکل 1-E" مشاهده می‌شود، این ناحیه دارای ساختاری بسیار ریز دانه (حدود 3 الی 7 میکرومتر)

این ویژگی را دارد که آزمایش بر روی نمونه‌هایی با ضخامت بیشتر و حتی در مواردی با ضخامت واقعی انجام می‌شود [1]. همچنین نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی مسیر شکست بزرگتری را نسبت به نمونه‌های شاری دارد و ارزیابی مناسبی را برای ویژگی‌های توقف ترک و دستیابی به مقاومت شکست پایدار<sup>1</sup>، فراهم می‌سازد [3,2]. از سوی دیگر سطح شکست در آزمایش شاری به دلیل کوچک بودن ابعاد نمونه و پیرو آن کوچک بودن اندازه ترک، با سطح شکست واقعی تفاوت دارد. بنابراین استفاده از آزمایش ضربه سقوطی (به‌ویژه برای فولادهای پر استحکام) ارجحیت دارد.

در آزمایش ضربه سقوطی مطابق استاندارد API 5L از نمونه چهارگوش فولادی که یک شیار در سطح تحت کشش آن (سطح زیرین) ایجاد شده، به عنوان نمونه آزمایشگاهی استفاده می‌شود [5,4]. ارتفاع سقوط وزنه بستگی به استحکام نمونه و ضخامت آن دارد و سرعت چکش در هنگام ضربه زدن باید بین 5 الی 9 متر بر ثانیه باشد. آزمایش ضربه سقوطی برای لوله‌هایی تا ضخامت 19 میلی‌متر بر روی نمونه‌هایی با همان ضخامت انجام می‌گیرد و نیازی به کاهش ضخامت لوله نمی‌باشد [4]. نواحی شکست ترد و نرم بوجود آمده در آزمایش ضربه سقوطی، بیانگر کیفیت فولادهای خطوط انتقال انرژی است. نتایج نشان می‌دهد حین آزمایش ضربه سقوطی حالت (مد) شکست از ترد (زیر شیار) به نرم (در سایر مناطق سطح مقطع نمونه) تغییر می‌کند [6]. در پژوهش‌های زیادی ریزساختار و سطح شکست آزمایش ضربه شاری و آزمایش ضربه سقوطی در فولادهای پر استحکام خطوط لوله نفت و گاز در نواحی مختلف بررسی شده است. اما همان‌گونه که ذکر شد ارزیابی نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی به دلیل ضخامت کامل لوله و مشارکت تمام ریزساختار دیواره لوله فولادی در تحمل بار از دقت بیشتری برخوردار است. سطح شکست نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی حاوی اطلاعات بسیار ارزشمندی در خصوص مسیر رشد ترک و نوع (مد یا حالت تنش) می‌باشد. به همین دلیل شکست‌نگاری این نمونه در چند سال اخیر مورد توجه خاص پژوهشگران قرار گرفته است [10] در تحقیق هوانگ و همکارانش [8]، انواع نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی که از فولادهای خطوط انتقال جدا شده است، جهت تحلیل ظاهر غیرعادی سطح شکست که در ناحیه ضربه چکش دستگاه آزمایش ضربه اتفاق می‌افتد، آزمایش شد. نمونه‌ها، دارای شیار پرسی<sup>2</sup> یا شیار ماشین-کاری<sup>3</sup> شده می‌باشد. در این تحقیق شیار در پشت نمونه<sup>4</sup> (در ناحیه‌ای که چکش ضربه می‌زند) جهت کاهش تشکیل ناحیه شکست معکوس<sup>5</sup> (ناحیه-های شکست تورقی<sup>6</sup> نزدیک به منطقه ضربه چکش که در آن سطح شکست ظاهر غیرعادی دارد) علاوه بر شیار پرسی و ماشین‌کاری شده استاندارد پیشنهاد شده است. ژانگ [9] به بررسی پدیده ظاهر غیرعادی سطح شکست در آزمایش ضربه سقوطی بر روی فولادهای پر استحکام خطوط انتقال پرداخته است. در تحقیق ژانگ، نمونه‌های مختلفی از نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی از فولاد API X70 در دماهای مختلف بررسی شده‌اند. ظاهر سطح شکست نمونه‌های مورد آزمایش در تحقیق مذکور به دما، نوع شیار و ضخامت نمونه وابسته است. در این تحقیق دلایل تفاوت در ظاهر غیرعادی سطح شکست، تغییر در وضعیت تنش در حین فرآیند شکست و تغییر سرعت شکست بیان شده است. در تحقیق فانگ و همکارانش نیز که به ارزیابی رشد ترک بر روی لوله‌های خطوط انتقال با استفاده از نمونه‌های آزمایش ضربه

<sup>7</sup> Delamination

<sup>8</sup> American Petroleum Institute (API)

<sup>9</sup> Yield strength

<sup>10</sup> Tensile strength

<sup>11</sup> Heat affected zone (HAZ)

<sup>12</sup> Acicular ferrite (AF)

<sup>13</sup> Widmanstätten ferrite

<sup>14</sup> Proeutectoid ferrite

<sup>15</sup> Bainite

<sup>16</sup> Polygonal ferrite

<sup>1</sup> Steady-state fracture resistance

<sup>2</sup> Pressed notch specimen

<sup>3</sup> Chevron notch specimen

<sup>4</sup> Back slot

<sup>5</sup> Inverse fracture

<sup>6</sup> Cleavage fracture

این شکل طول نمونه 305 میلی‌متر، ارتفاع آن 76.2 میلی‌متر و ضخامت نمونه برابر ضخامت لوله (14.3 میلی‌متر) است. همچنین شعاع چکش و سندان‌ها برابر 25.4 میلی‌متر می‌باشد.

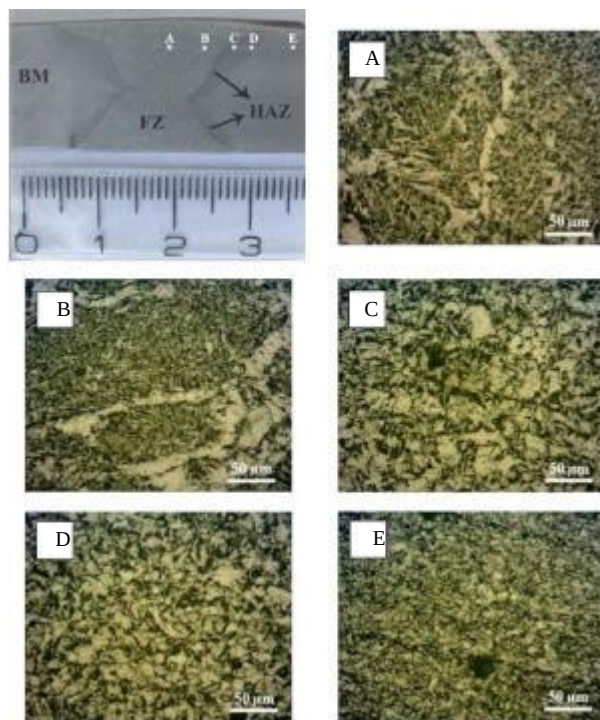
برای تهیه نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی مطابق استاندارد API 5L3 [13]، قطعات از بدنه لوله واقعی خط انتقال گاز دارای درزجوش مارپیچ با قطر خارجی 1219 میلی‌متر و ضخامت دیواره 14.3 میلی‌متر بوسیله مشعل هوا-برش جدا شدند (شکل 3).

پس از جداسازی نمونه‌ها و مسطح کردن آن‌ها با دستگاه پرس (کرنش ایجاد شده طی کارسرد در استاندارد اجازه داده شده است) عملیات ماشین‌کاری روی لبه‌های برش‌خورده نمونه‌ها برای رسیدن به ابعاد استاندارد و حذف ناحیه متأثر از حرارت ایجاد شده در عملیات برش‌کاری انجام شد (شکل 4).

شیار نمونه‌ها مطابق استاندارد API 5L3 می‌تواند از نوع پرسی یا ماشین‌کاری شده (شیار شورون که V-شکل است) باشد که به وسیله ماشین تخلیه الکتریکی<sup>3</sup> (وایرکات<sup>4</sup>) ایجاد می‌شود. در این تحقیق نمونه با هر دو نوع شیار آزمایش شد که فقط نتایج نمونه با شیار ماشین‌کاری شده با عمق شیار 5.1 میلی‌متر گزارش شده است. شیار پرسی که در نمونه آزمایشگاهی توسط دستگاه پرس با اعمال فشار روی اسکنه فولادی ایجاد می‌شود، به اندازه کافی تیز نبوده و تنش‌های باقیمانده فشاری نیز در منطقه‌ای نزدیک به نوک شیار وجود دارد. در مقابل، شیار ماشین‌کاری شده به اندازه کافی تیز بوده و تنش‌های باقیمانده در ناحیه نوک شیار وجود ندارد. نوع شیار می‌تواند بر انرژی شروع شکست تأثیر گذارد [14].

## 2-2- انجام آزمایش ضربه سقوطی

برای انجام آزمایش از دستگاه ضربه سقوطی که در گروه پژوهش مطالعات لوله و صنایع وابسته دانشگاه بیرجند طراحی و ساخته شده است، استفاده شد. پس از قرار گرفتن نمونه در کارگیر دستگاه ضربه سقوطی، نمونه توسط شابلنی دقیقاً در مرکز میز قرار می‌گیرد (شکل 5). این تنظیم موجب می‌شود مرکز چکش دستگاه ضربه، دقیقاً به وسط درزجوش نمونه برخورد کند. پیچ‌های نگهدارنده نیز توسط ترک‌متر با گشتاور 18 نیوتن-متر محکم شد تا شرایط برای دو سمت نمونه کاملاً یکسان باشد (شکل 5).



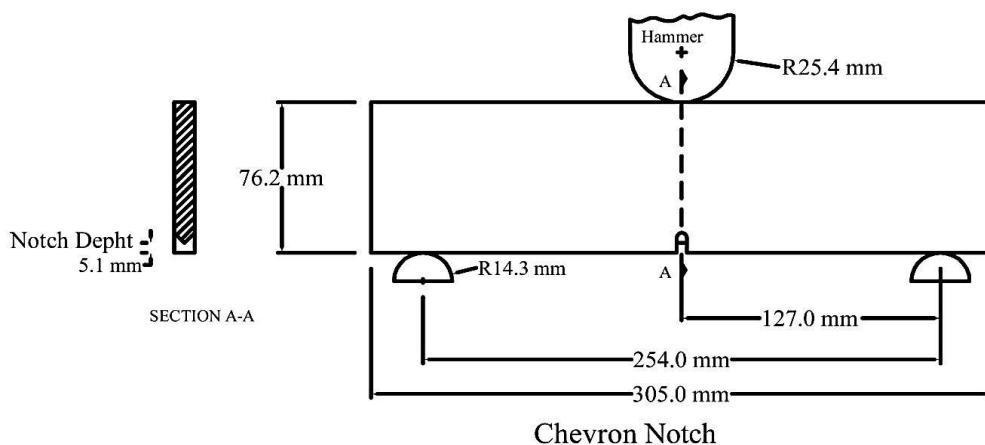
**Fig. 1** Micrographs of welded joint and microstructure of different sub-zones: (A) center of the fusion zone, (B) near the end of the fusion zone, (C) coarse-grained HAZ, (D) fine-grained HAZ, (E) base metal (unaffected zone)[11]

شکل 1 ریزساختار زیر نواحی مختلف: (A) مرکز ناحیه مذاب، (B) نزدیک به انتهای ناحیه مذاب، (C) دانه‌بندی درشت ناحیه متأثر از حرارت، (D) دانه‌بندی ریز ناحیه متأثر از حرارت، (E) فلز پایه [11]

است. فریت سوزنی ساختاری مطلوب جهت بهبود چقرمگی ناحیه جوش محسوب می‌شود. طبیعت در هم قفل شونده<sup>1</sup> ساختار فریت سوزنی به همراه دانه‌بندی ریز آن، موجب افزایش مقاومت در برابر رشد ترک ورقه‌ای<sup>2</sup> می‌گردد [11].

## 2-1- آماده‌سازی نمونه

ابعاد استاندارد نمونه‌های آزمایشگاهی در "شکل 2" نشان داده شده است. در



**Fig.2** Dimensions of the DWTT specimen with Chevron notch, supports and hammer [13]

شکل 2 ابعاد نمونه با شیار ماشین‌کاری شده (شورون)، تکیه‌گاه‌ها و چکش در آزمایش ضربه سقوطی [13]

<sup>3</sup> Electrical discharge machining

<sup>4</sup> Wire-cut

<sup>1</sup> Interlocking nature

<sup>2</sup> Cleavage crack



جهت تنظیم دقیق ارتفاع سقوط وزنه میکروسویچی روی بدنه دستگاه ضربه سقوطی نصب شده است (شکل 6). پس از رهاسازی چکش (متصل به میز سقوط کننده به وزن 700 کیلوگرم) از ارتفاع 2.5 متری (فاصله مرکز جرم چکش از نمونه 2.4 متر است)، نمونه کاملاً شکسته و سپس سطح شکست آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. تمام آزمایش‌ها در دمای محیط با سرعت ضربه 6.3 متر بر ثانیه انجام شده است.

### 3- بررسی سطح شکست نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی

در "شکل‌های 7 و 8" نمای فوقانی نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار شورون به عمق 5.1 میلی‌متر نشان داده شده است. نکته قابل توجه در آزمایش انجام شده، انحراف مسیر شکست از ناحیه جوش به ناحیه متأثر از حرارت و سپس فولاد پایه می‌باشد.



Fig. 6 Microswitch used on DWTT machine for exact adjustment of hammer height

شکل 6 میکروسویچ نصب شده روی بدنه دستگاه ضربه سقوطی برای تنظیم دقیق ارتفاع سقوط چکش

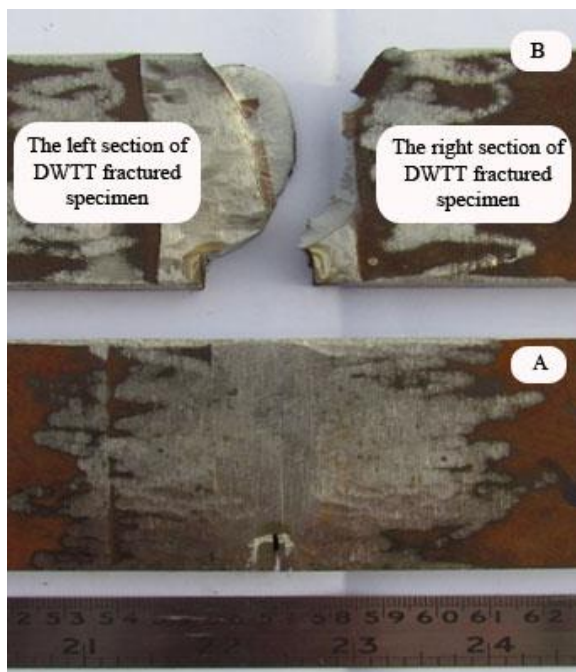


Fig.7 DWTT specimen, A) before test, B) after test

شکل 7 نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی، A) قبل از آزمایش B) بعد از آزمایش



Fig. 3 Specimen machined from an actual gas pipe with spiral seam weld

شکل 3 نمونه جدا شده از لوله واقعی خط انتقال گاز با درز جوش مارپیچ



Fig. 4 The DWTT specimens with spiral seam weld of API X65 steel  
شکل 4 نمونه‌های آزمایشگاهی ضربه سقوطی حاوی درز جوش مارپیچ از جنس فولاد API X65 با شیار ماشین‌کاری شده

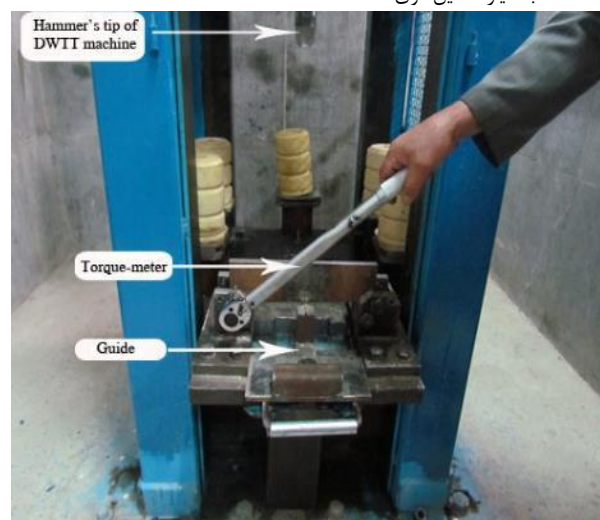


Fig. 5 Guide and torque-meter used to achieve identical test conditions

شکل 5 شابلون و ترک‌متر مورد استفاده جهت یکسان بودن شرایط آزمایشگاهی برای تمام نمونه‌ها



**Fig. 8** Details of fracture path on the top view of fractured specimen  
شکل 8 جزئیات مسیر رشد ترک در نمای فوقانی نمونه شکسته شده ضربه سقوطی



**Fig. 9** Fracture surface of DWTT specimen with spiral seam weld  
شکل 9 سطح شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی حاوی درزجوش مارپیچ

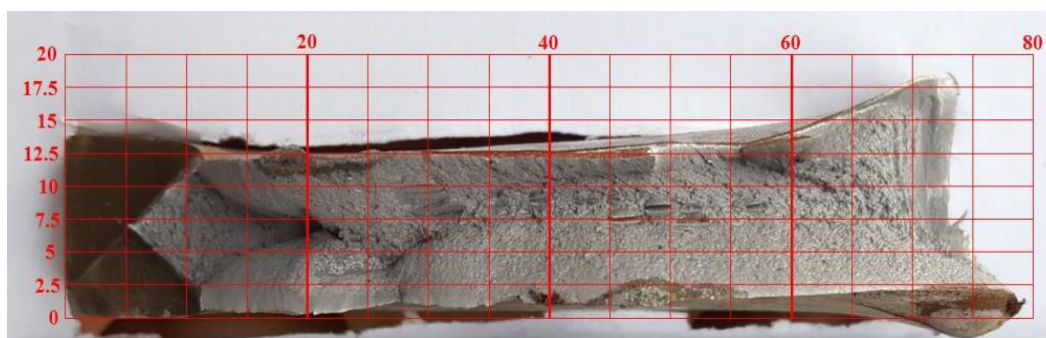
عرض درزجوش مارپیچ بر روی نمونه آزمایشگاهی 20 میلی‌متر می‌باشد. همان‌گونه که در "شکل 8" (نمای فوقانی نمونه شکسته شده با بزرگ‌نمایی بیشتر) مشاهده می‌شود، شکست از محل شیار ماشین‌کاری شده آغاز می‌شود و با تمایل به سمت راست نمونه به سوی ناحیه متأثر از حرارت ادامه مسیر می‌دهد. از آن‌جا که سختی ناحیه متأثر از حرارت (208 واحد ویکرز) نسبت به دو ناحیه فلز جوش (218 واحد ویکرز) و فلز پایه (211 واحد ویکرز) کمتر است [11]، بیشتر مسیر رشد شکست در این ناحیه قرار دارد. سپس شکست در انتهای مسیر خود وارد ناحیه فولاد پایه (API X65) می‌شود. سطح شکست نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی (حاوی درزجوش مارپیچ در تحقیق حاضر) در "شکل 9" نشان داده شده است. مقایسه سطح شکست چند نمونه فولاد پایه API X65 که در دماهای مختلف در آزمایش ضربه سقوطی شکسته شده‌اند نیز در "شکل 10" قابل مشاهده است.

در "شکل 10"، نمونه‌ها از چپ به راست به ترتیب در دماهای 10، 30، 50، 70، 90، 110- درجه سانتی‌گراد آزمایش شده‌اند [15]. سطح شکست جوش (شکل 9) برخلاف سطح شکست فولادهای پایه (شکل 10) زبر و ناهموار و دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است.

همان‌گونه که در "شکل 9" مشاهده می‌شود، شکست تورقی (شکست ترد در ناحیه مثلی ابتدایی) که نشانگر شکست ترد است، درست زیر شیار ماشین‌کاری شده شکل گرفته است. بلافاصله پس از شکست تورقی اولیه، لبه برشی با زاویه 45 درجه ایجاد شده است. این لبه برشی نماینده منطقه‌ای از سطح شکست است که تحت شرایط تنش صفحه‌ای و شکست برشی (شکست نرم) می‌باشد و نشانگر چقرمگی بالای ماده است. سطح شکست برشی بیشتر سطح شکست را اشغال نموده و در تمام ضخامت نمونه گسترش یافته است. جهت بررسی دقیق‌تر جزئیات، سطح شکست سمت چپ نمونه به همراه ابعاد آن در "شکل 11" نشان داده شده است.



**Fig. 10** Fracture surfaces of DWTT specimen (base metal of API X65 and wall thickness is 23.4 mm) [15]  
شکل 10 سطح شکست چند نمونه آزمایش ضربه سقوطی (با شیار پرسی) با ضخامت 23.4 میلی‌متر از جنس فولاد پایه API X65 [15]



**Fig. 11** Fracture surface of left part of DWTT specimen with crack growth direction from left to right (dimensions in mm)  
شکل 11 سطح شکست قسمت سمت چپ نمونه به همراه ابعاد مربوطه (جهت رشد ترک از چپ به راست و ابعاد به میلی‌متر است)



می‌شود و از طریق نوک شیار به نمونه منتقل می‌شود. این انرژی صرف اولین مرحله شکست که شکست تورقی می‌باشد، می‌شود. هنگامی که انرژی بالای ضربه به علت تغییر شکل پلاستیک مصرف شد، شکست اولین مرحله رشد ناپایدار خود را (شکست تورقی) تجربه می‌کند [2].

باید توجه داشت که نمونه با شیار ماشین‌کاری شده به دلیل وجود شیار تیز و تمرکز تنش در نوک شیار به انرژی کمتری برای شروع شکست نیاز دارد [14]. از این رو پس از ناحیه شکست تورقی اولیه، انرژی کرنشی الاستیک ذخیره شده در نمونه، برای ادامه فرآیند شکست کافی نیست. اما از آنجا که انرژی دستگاه ضربه سقوطی زیاد است، چکش مجدداً انرژی لازم برای شکست را فراهم می‌کند. انرژی کرنشی الاستیک در نمونه افزایش می‌یابد و شکست در نمونه نیز آغاز می‌گردد. مقاومت بالای درزجوش در برابر تغییر شکل پلاستیک، موجب ذخیره مجدد انرژی کرنشی الاستیک در نمونه شده و آغاز مرحله بعدی شکست با پارگی کوچکی شروع می‌شود. نیروی شروع ترک متناظر با این مرحله از مرحله اول متفاوت است.

ناحیه شکست برشی در 23 الی 63 میلی‌متری سطح شکست نمونه قرار گرفته است (شکل B-12). "شکل 14" تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه شکست نرم (شکل B-12) را نشان می‌دهد. در "شکل 14" هیچ اثری از صفحات رخ برگی مشاهده نمی‌شود و تمام تصویر حفره‌های ریزی را نشان می‌دهد که نشان دهنده شکست نرم است. از آنجا که در آزمایش ضربه سقوطی انرژی بسیار زیادی آزاد می‌شود، ترک در مرحله دوم رشد خود (شکست برشی) به صورت پایدار رشد می‌کند [2]. در ناحیه شکست برشی نشان داده شده در "شکل B-12" خطوط طولی مشاهده می‌شود. این خطوط علایم ساحلی<sup>5</sup> یا تیر مانند نامیده می‌شود. همچنین علایم ساحلی مایل و دارای انحنا (شکل V) نیز قابل مشاهده است که به سمت منشأ ترک بر می‌گردد. دلیل عدم آشکار شدن بیشتر این خطوط، غلبه نشانه‌های دیگر شکست مانند لایه لایه شدن‌هایی که به موازات جبهه ترک عمل می‌کند، است.

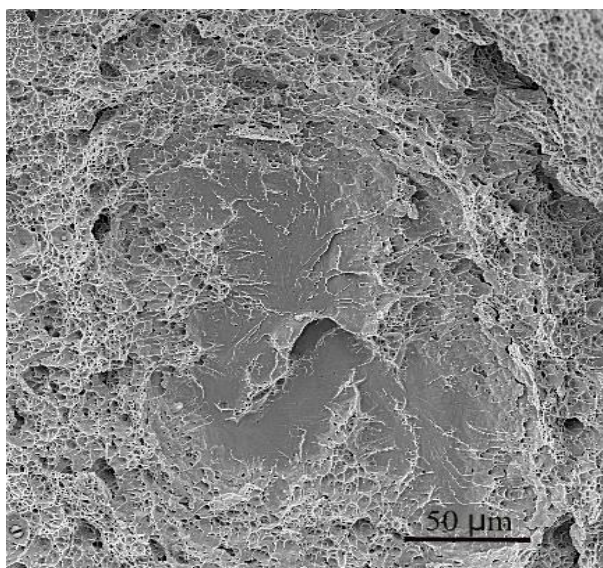


Fig. 13 SEM micrograph of cleavage fracture zone (fig. 12-A)

شکل 13 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه تورقی زیر شیار ماشین‌کاری شده (شکل A-12)

شکست تورقی تا 21 میلی‌متری از لبه نمونه ادامه پیدا می‌کند و پس از آن ناحیه شکست برشی قرار دارد (شکل A-12). "شکل 13" تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>1</sup> از ناحیه تورقی در زیر شیار ماشین‌کاری شده (شکل A-12) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در "شکل 13" مشخص است، صفحات رخ برگی<sup>2</sup> که نشان دهنده شکست ترد هستند، با حفره‌های<sup>3</sup> بسیار ریز (نشان-دهنده شکست نرم) احاطه شده‌اند. در حقیقت وجود حفره‌های بسیار ریز مربوط به شکست نرم در این ناحیه از شکست، باعث صرف انرژی زیاد حین فرآیند شکست فولاد می‌شود.

پارگی کوچکی درست در انتهای ناحیه شکست تورقی مشاهده می‌شود (شکل A-12) که در اثر مقاومت بالای درزجوش در برابر تغییر شکل پلاستیک به وجود آمده است. شیار ماشین‌کاری شده موجب کرنش سختی اولیه در نوک شیار می‌شود. بنابراین انرژی کرنشی الاستیک<sup>4</sup> در نمونه ذخیره

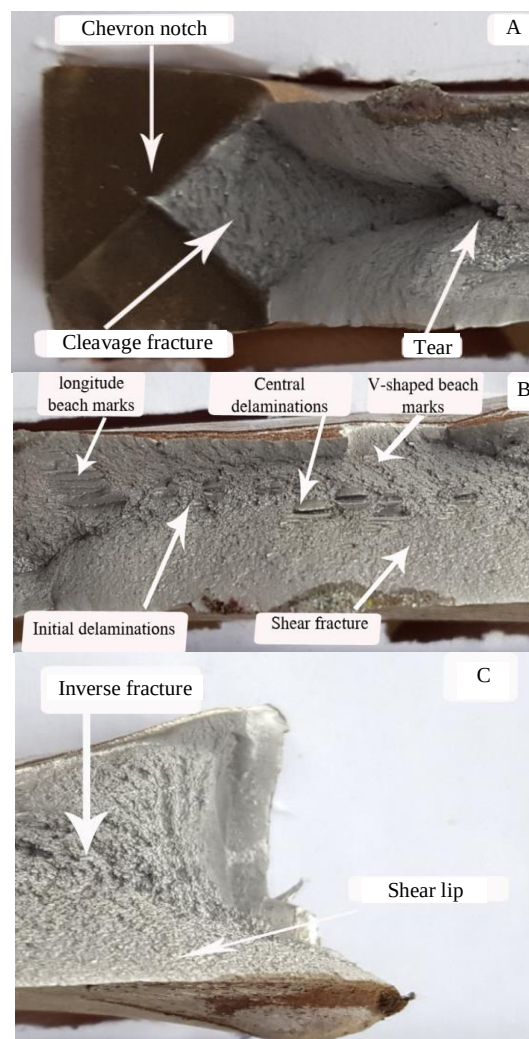


Fig. 12 Fracture surface of left part of DWTT specimen with crack growth direction from left to right: (A) first section: initial 23 mm crack growth, (B) second section: 23-63 mm crack growth and (C) third section: 63-79 mm crack growth

شکل 12 جزئیات سطح شکست قسمت سمت چپ نمونه (جهت رشد ترک از چپ به راست)، (A) 23 میلی‌متر ابتدای نمونه، (B) از 23 الی 63 میلی‌متری نمونه، (C) از 63 الی 79 میلی‌متری نمونه

<sup>1</sup> Scanning electron microscope (SEM)

<sup>2</sup> Facet

<sup>3</sup> dimple

<sup>4</sup> Elastic strain energy

<sup>5</sup> Beach mark

در نمونه حاضر شکست معکوس در محل ضربه چکش در محلی که پهنای سطح شکست به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد، اتفاق افتاده است. این نوع از شکست معکوس بسیار مهم است، زیرا چقرمگی نمونه افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش کرنش فشاری برشی است که به جهت عواملی چون متراکم شدن چکش، خم شدن نمونه و نیروی اصطکاک تکیه‌گاه‌های دستگاه ضربه در ناحیه تحت ضربه چکش (قبل از فرآیند شکست)، ایجاد شده است. تکیه‌گاه غلطی دستگاه ضربه سقوطی می‌تواند نیروی اصطکاک و کرنش فشاری برشی نمونه را طی فرآیند شکست کاهش دهد. این موضوع می‌تواند سطح شکست معکوس در این نوع نمونه‌ها را کاهش دهد [18].

دستگاه آزمایش ضربه سقوطی مورد استفاده در تحقیق حاضر نیز دارای تکیه‌گاه‌های غلطی بوده و همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سطح شکست معکوس کوچک بوده و تنها در انتهای نمونه شکل گرفته است.

در ناحیه ضربه چکش در نمونه حاضر، سطح شکست معکوس دارای شکست تورقی است. نواحی تورق سطح شکست معکوس، به دلیل افزایش تغییر شکل فشاری و افزایش ضخامت نمونه در این ناحیه به‌وجود می‌آید. این نوع از شکست معکوس، در شکست انفجاری لوله‌ها به‌وجود نمی‌آید، زیرا طی فرآیند شکست، تأثیرات تنش‌های سه بعدی نوک ترک، ضخامت جداره لوله را کاهش می‌دهد [18].

سطح شکست قسمت سمت راست نمونه نیز در "شکل 15" نشان داده شده است. به دلیل شباهت فراوان سطح‌های شکست در دو سمت نمونه و همچنین جلوگیری از طولانی شدن بحث، تنها به تشریح کامل سطح شکست سمت چپ نمونه اکتفا می‌شود. "شکل 16"، نمایی از جزئیات مشخص شده روی سطح شکست سمت چپ نمونه را بدون در نظر گرفتن کاهش و افزایش ضخامت نمونه نشان می‌دهد.

#### 4- بررسی تغییر ضخامت در نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی

همان‌گونه که در "شکل 11" مشاهده می‌شود، ضخامت نمونه به هنگام شکستن تغییر می‌کند. تغییرات ضخامت برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین‌کاری شده در "شکل 17" نشان داده است (مطابق جزئیات شکل 11). ضخامت نمونه در هر 5 میلی‌متر در طول سطح شکست (در مجموع 17 نقطه)، با دقت دهم میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

همان‌گونه که در "شکل 17" دیده می‌شود، ضخامت نمونه در ناحیه شکست تورقی (زیر شیار ماشین‌کاری شده) کاهش زیادی می‌یابد و از 14.3 (ضخامت اولیه نمونه و دیواره لوله فولادی) به 11.9 میلی‌متر می‌رسد. میلی‌متر کمترین ضخامت نمونه است که در ناحیه شکست تورقی قرار دارد. انرژی ضربه قبل از شروع فرآیند شکست، صرف تغییر شکل پلاستیک در نمونه می‌گردد. از آن‌جا که در آزمایش ضربه سقوطی، شیار نمونه در پایین محل ضربه چکش در بالا قرار می‌گیرد، نیمه پایین نمونه، تحت کشش قرار دارد (برعکس نیمه بالایی آن تحت فشار قرار دارد). کشش در قسمت پایین نمونه و درست در اطراف شیار بیشترین مقدار خود را دارد و موجب کاهش ضخامت نمونه در این قسمت می‌گردد.

پس از آن در ناحیه شکست برشی ضخامت نمونه تقریباً دارای مقدار ثابت و برابر 12.2 میلی‌متر است. همان‌گونه که پیش از این بیان شد، ناحیه شکست برشی با رشد پایدار ترک همراه است. از سویی با توجه اینکه ناحیه شکست برشی در دو سمت خط مرکزی و در مجاورت ناحیه‌های کشش (نزدیک شیار) و فشار (محل ضربه چکش) نمونه قرار گرفته است، تغییر بسیار کم ضخامت این ناحیه دور از انتظار نیست.

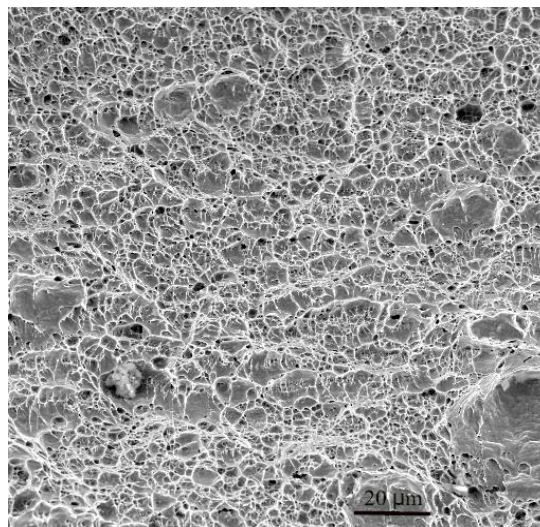


Fig. 14 SEM micrograph of Shear fracture zone (fig. 12-B)

شکل 14 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه شکست نرم (شکل 12-B)

در ناحیه شکست برشی نشان داده شده در "شکل 12-B"، لایه لایه شدن - های طولی تقریباً به موازات مسیر رشد ترک دیده می‌شود. لایه لایه شدن - های ابتدای ناحیه، بسیار کوتاه (طول 1 میلی‌متر) و بسیار باریک (عرض کمتر از 0.5 میلی‌متر) می‌باشد. لایه لایه شدن‌های بعدی که تراکم آن‌ها در مرکز نمونه بیشتر است، کمی بلندتر (طول کمتر از 4 میلی‌متر) و عریض‌تر (عرض کمتر از 1 میلی‌متر) از لایه لایه شدن‌های ابتدایی است. لایه لایه شدن‌های طولی ابتدا و مرکز نمونه هر کدام 5 بار تشکیل شده است (در مجموع 10 عدد). از آن‌جا که بیشتر سطح شکست برشی در ناحیه متأثر از حرارت قرار دارد، لایه لایه شدن‌ها می‌تواند نشانگر توانایی کمتر این ناحیه از نمونه، در برابر تغییر شکل‌های پلاستیکی باشد که به‌علت ریزساختار ناهمسانگرد و سختی بالای آن بوجود آمده است. مطابق استاندارد API5L3 سطوح لایه لایه‌ای بیشتر در ناحیه شکست برشی دیده می‌شود [13]. در پژوهش حاضر نیز سطوح لایه لایه‌ای، عموماً در ناحیه شکست برشی مشاهده می‌شود.

لایه لایه شدن (یعنی ترک‌های ثانویه قابل رویت<sup>1</sup>)، که عمود بر سطح شکست کلی و موازی با جهت شکست است، می‌تواند در هر دو ناحیه تورقی ابتدایی و شکست برشی وجود داشته باشد. اندازه و شکل ناحیه‌های مختلف شکست، همچنین تعداد، طول و توزیع لایه لایه شدن‌ها، تابعی از دمای انجام آزمایش، ضخامت نمونه، شکل شیار، ترکیب و ریزساختار فولاد می‌باشد [14]. در منطقه ضربه چکش، لبه‌های برشی در نمونه تغییر شکل یافته مشاهده می‌شوند. از 63 الی 79 میلی‌متری، سطح شکست معکوس (ظاهر غیرعادی شکست که در سطح شکست نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی تشکیل می‌شود) قابل مشاهده است (شکل 12-C). مسیر شکست در ناحیه شکست معکوس وارد ناحیه فولاد پایه شده است. مشاهدات متعددی نیز از ظاهر غیرعادی سطح شکست (که در آن پس از شکست برشی، شکست تورقی اتفاق افتاده) گزارش شده است [8, 10, 16, 17]. ظاهر غیرعادی سطح شکست می‌تواند در نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی با شیارهای مختلف مشاهده شود. ظاهر غیرعادی سطح شکست حتی در نمونه‌هایی با شیار ماشین‌کاری شده، که نیرو و انرژی شروع شکست در این نوع نمونه‌ها می‌تواند کاهش یابد، به‌طور کامل از بین نمی‌رود [14, 18].

<sup>1</sup> Macroscopic secondary cracks





Fig. 15 Fracture surface of right part of DWTT specimen with crack growth direction from left to right

شکل 15 سطح شکست قسمت سمت راست نمونه (جهت رشد ترک از چپ به راست)

افزایش ضخامت نمونه از انتهای ناحیه شکست برشی و با فاصله 55 میلی‌متر از ابتدای شیار ماشین‌کاری شده آغاز می‌شود. به گونه‌ای که در انتهای ناحیه شکست برشی ضخامت نمونه با ضخامت نمونه اصلی (14.3 میلی‌متر) 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 18 میلی‌متر است. افزایش ضخامت در ناحیه شکست معکوس نیز به دلیل تحت فشار گرفتن این ناحیه از نمونه و افزایش کرنش فشاری اتفاق افتاده است. دو ناحیه شکست تورقی ابتدا و انتهای نمونه (ناحیه شکست معکوس) در مکان‌هایی اتفاق افتاده‌اند که تغییر ضخامت زیادی بوجود آمده است. درحقیقت تغییر ناگهانی ضخامت از دلایل شکل گرفتن ناحیه‌های تورقی است.

#### 5- محاسبه سطح شکست برشی نمونه آزمایش ضربه سقوطی

مطابق استاندارد API 5L3 در نمونه‌های معتبر، در نوک شیار شکست ترد وجود دارد. اگر کل سطح شکست نمونه، شکست نرم را نشان دهد، استثنای وجود دارد و نمونه معتبر در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ای که در نوک شیار اولیه آن شکست نرم وجود دارد و سپس به شکست ترد تغییر می‌کند، نامعتبر در نظر گرفته می‌شود [13].

سطح شکستی که باید در محاسبه درصد سطح شکست برشی (شکست نرم)، مورد ارزیابی قرار گیرد، در "شکل 18" نشان داده شده است. اگر بیش از 85 درصد سطح شکست نمونه را سطح شکست نرم تشکیل دهد، نرمی نمونه مطلوب در نظر گرفته می‌شود. در غیر این صورت رفتار قطعه به رفتار ترد نزدیک‌تر است.

درصد سطح شکست برشی، در رابطه (1) ارایه شده است [13]:

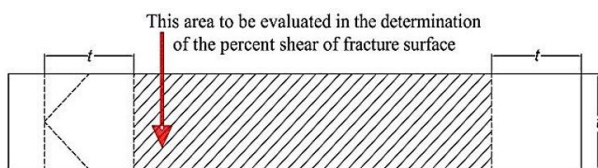


Fig. 18 Fracture surface included in shear area determination [13]

شکل 18 سطح شکست محاسبه شده در آزمایش ضربه سقوطی با شیار ماشین‌کاری شده [13]

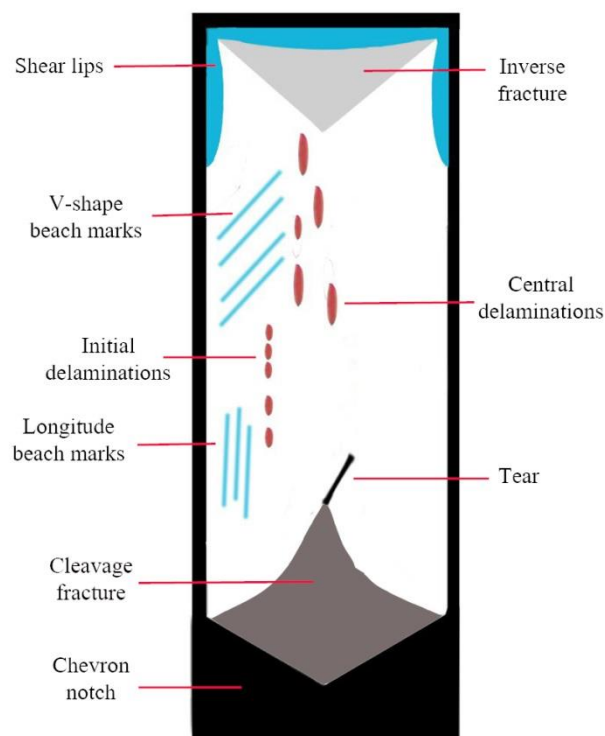


Fig. 16 Schematic illustrations of fracture surface (left section of specimen)

شکل 16 نمایی از جزئیات مشخص شده روی سطح شکست سمت چپ نمونه

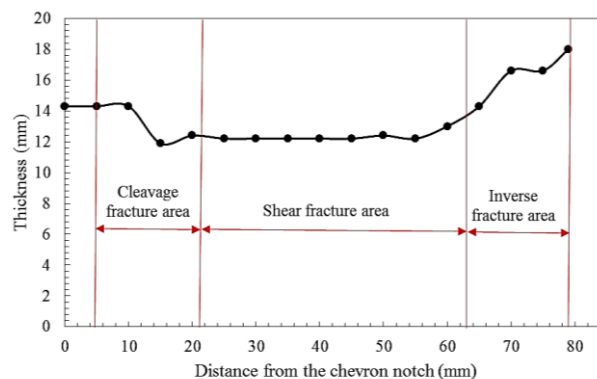


Fig. 17 Variation of specimen thickness (mm) versus distance from the chevron notch

شکل 17 تغییرات ضخامت برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین‌کاری شده



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

در رابطه (1)،  $A$  عرض سطح شکست ترد در خط  $t$  (به میلی‌متر) و  $B$ ، طول سطح شکست ترد در میان دو خط  $t$  (به میلی‌متر) نشان داده شده در "شکل 18" است.  $t$  نیز ضخامت نمونه مورد آزمایش می‌باشد. همان‌گونه که ذکر شد لایه لایه شدن در نمونه حاضر باریک و موازی با جهت شکست (موازی با صفحه ورق) می‌باشد. مطابق استاندارد API 5L3، لایه لایه شدن‌هایی از این نوع، در محاسبه مساحت سطح شکست برشی وارد نمی‌شود [13].

نتایج آزمایش ضربه سقوطی در جدول 1 نشان داده شده است.  $t$  ضخامت نمونه کامل و برابر 14.3 میلی‌متر می‌باشد. درصد سطح برشی محاسبه شده برای نمونه بیشتر از 85 درصد می‌باشد (درصد سطح برشی نمونه 99.4 درصد است). این موضوع بیانگر چقرمگی عالی درزجوش مارپیچ فولاد API X65 می‌باشد.

سطح شکست ترد عموماً شامل سطح شکست تورقی ابتدایی است، اما سطح شکست معکوس نیز جزو سطح شکست ترد به حساب آورده می‌شود. زیرا شکست معکوس که در منطقه ضربه چکش اتفاق می‌افتد، به صورت شکست تورقی می‌باشد. در تحقیق حاضر، درصد سطح برشی محاسبه شده بدون در نظر گرفتن سطح شکست معکوس، برابر با درصد سطح برشی است که سطح شکست معکوس را در نظر می‌گیرد (مطابق توصیه استاندارد در محاسبه درصد سطح برشی، سطح شکست معکوس در نظر گرفته می‌شود). دلیل این امر استفاده از شیار ماشین‌کاری شده است. زیرا استفاده از شیار با نوک‌تیز می‌تواند مساحت سطح شکست معکوس را کاهش دهد.

در نمونه حاضر، این کاهش به حدی بوده که سطح شکست معکوس انتهای نمونه وارد ناحیه برشی نشده است. از سوی دیگر، ناحیه تورقی ابتدایی به میزان کمی وارد ناحیه برشی نمونه شده است. هرچند که در نمونه حاضر، برای محاسبه درصد سطح برشی (رابطه (1))، از دو ناحیه تورقی ابتدا و انتهای نمونه، تنها مقدار کمی از ناحیه تورقی ابتدایی به طول 2.2 میلی‌متر در سطح شکست برشی قرار دارد، براساس پژوهش تعدادی از محققان نیز، تنها باید سطح شکست تورقی ابتدایی را جزو سطح شکست ترد به حساب آورد. زیرا همان‌گونه که ذکر شد، شکست معکوس در خطوط واقعی انتقال اتفاق نمی‌افتد.

## 6- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، برای نخستین بار سطح شکست ماکروسکوپیک نمونه آزمایش ضربه سقوطی حاوی درزجوش مارپیچ جدا شده از لوله واقعی خط انتقال از جنس API X65 با شیار ماشین‌کاری شده (با عمق 5.1 میلی‌متر) بررسی شد. مشاهدات حاصل از شکست نگاری عبارت است از:

1. در نمونه شکسته شده، مسیر شکست کمی بعد از شیار اولیه وارد ناحیه متأثر از حرارت شده و سپس در منطقه ضربه چکش وارد فولاد پایه می‌شود. بیشتر مسیر رشد شکست در ناحیه متأثر از حرارت قرار دارد،

جدول 1 محاسبه درصد سطح برشی در نمونه آزمایش ضربه سقوطی

| Table 1 Percent shear area measured of DWTT specimen |           | درصد سطح شکست برشی |                   | نمونه                          |
|------------------------------------------------------|-----------|--------------------|-------------------|--------------------------------|
| A<br>(mm)                                            | B<br>(mm) | شامل سطح شکست      | بدون در نظر گرفتن | درزجوش مارپیچ<br>فولاد API X65 |
|                                                      |           | معکوس              | معکوس             |                                |
| 2.1                                                  | 2.2       | 99.4               | 99.4              |                                |

1. زیرا سختی این ناحیه نسبت به دو ناحیه فلز جوش و فلز پایه کمتر است.
2. شکست تورقی (شکست ترد)، درست زیر شیار ماشین‌کاری شده تشکیل شده است. این نوع شکست شرط صحت آزمایش مطابق دستورالعمل استاندارد است.
3. بلافاصله پس از شکست تورقی اولیه، شکست برشی مشاهده می‌شود. ناحیه شکست برشی در 23 الی 63 میلی‌متری نسبت به شیار ماشین‌کاری شده قرار گرفته است.
4. در ناحیه شکست برشی خطوط علائم ساحلی طولی و V-شکل، دیده می‌شوند که به سمت منشا ترک برمی‌گردد. لایه لایه شدن، موجب شده این خطوط به مقدار کمی شکل گیرد.
5. لایه لایه شدن‌های طولی که به موازات مسیر رشد ترک و در ناحیه شکست برشی وجود دارد، کوتاه (طول کمتر از 4 میلی‌متر) و باریک (عرض کمتر از 1 میلی‌متر) است. تراکم لایه لایه شدن در مرکز نمونه بیشتر و در مجموع 10 بار تشکیل شده است. لایه لایه شدن می‌تواند نشانگر توانایی کمتر ناحیه شکست برشی (که در منطقه متأثر از حرارت قرار دارد) در برابر تغییر شکل‌های پلاستیکی باشد که به علت ریزساختار ناهمسانگرد و سختی بالای آن به وجود آمده است.
6. در منطقه ضربه چکش، لبه‌های برشی در نمونه تغییر شکل یافته مشاهده می‌شود. مسیر شکست در ناحیه شکست معکوس که در فاصله 63 الی 79 میلی‌متری نسبت به شیار ماشین‌کاری شده نمونه قابل مشاهده است، وارد ناحیه فولاد پایه شده است. این نوع از سطح شکست معکوس بسیار مهم است، زیرا چقرمگی نمونه افزایش می‌یابد. جهت کاهش سطح شکست معکوس، دستگاه آزمایش ضربه سقوطی مورد استفاده در تحقیق حاضر دارای تکیه‌گاه‌های غلطکی بوده و نتایج حاکی از آن است که سطح شکست معکوس کوچکی، تنها در انتهای نمونه شکل گرفته است.
7. درصد سطح برشی محاسبه شده برای نمونه 99.4 درصد است که نشانگر چقرمگی بسیار بالای درزجوش مارپیچ فولاد API X65 می‌باشد. همچنین، درصد سطح برشی محاسبه شده بدون در نظر گرفتن سطح شکست معکوس، با درصد سطح برشی که سطح شکست معکوس را در نظر می‌گیرد، برابر است. زیرا استفاده از ماشین‌کاری شده می‌تواند مساحت سطح شکست معکوس را کاهش دهد. در نمونه حاضر، این کاهش به حدی بوده که سطح شکست معکوس انتهای نمونه وارد ناحیه برشی نشده است.
8. ضخامت نمونه در ناحیه شکست تورقی ابتدای نمونه کاهش زیادی می‌یابد. به گونه‌ای که کمترین مقدار آن (11.9 میلی‌متر) در این ناحیه قرار دارد. در ناحیه شکست برشی ضخامت نمونه تقریباً دارای مقدار ثابتی است. ضخامت با شیب قابل توجهی در ناحیه شکست معکوس افزایش می‌یابد. بیشترین ضخامت نمونه شکسته شده آزمایش ضربه سقوطی که در انتهای سطح شکست معکوس قرار دارد، برابر 18 میلی‌متر است. نیمه پایین نمونه، تحت کشش قرار دارد و برعکس نیمه بالایی آن تحت فشار قرار دارد. کاهش و افزایش ضخامت در ابتدا و انتهای نمونه نیز به همین دلیل اتفاق افتاده است. تغییر ناگهانی ضخامت از دلایل شکل گرفتن ناحیه‌های تورقی است.

## 7- تشکر و قدردانی

- No. 1-2, pp. 18–27, 2004.
- [9] Y. Zheng, The fracture during drop-weight tear test of high performance pipeline steel and its abnormal fracture appearance, *Proceedings of the 20th European Conference on Fracture (ECF20)*, Trondheim, Norway, June-July 30-4, 2014.
- [10] J. Fang, J. Zhang, L. Wang, Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel from DWTT specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 124-125, pp.18-29, 2014.
- [11] S. H. Hashemi, D. Mohammadyani, Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 98, pp. 8-15, 2012.
- [12] F. Xiao, B. Liao, D. Ren, Y. Shan, K. Yang, Acicular ferritic microstructure of a low-Carbon Mn–Mo–Nb microalloyed pipeline steel, *Materials Characterization*, Vol. 54, No. 4-5, pp. 305- 314, 2005.
- [13] API RP 5L3, *Recommended Practice Conducting Drop-Weight Tear Test on Line Pipe*, 3th Edition, American Petroleum Institute (API), Washington DC, pp. 1-9, 1996.
- [14] S. Hong, S. Y. Shin, S. Lee, N. J. Kim, 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*, Vol. 42A, No. 9, pp. 2619-2632, 2011.
- [15] K. O. Halsen, E. Heier, Drop weight tear testing of high toughness pipeline material, *Proceedings of the International Pipeline Conference (IPC2004)*, Calgary, Alberta, Canada, October 4-8, 2004.
- [16] T. Amano, T. Fujishiro, Y. shinohara, T. Inoue, Evaluation of pre-strain effect on abnormal fracture occurrence in drop-weight tear test for linepipe steel with high Charpy energy, *Proceedings of the 21st European Conference on Fracture (ECF21)*, Catania, Italy, June 20-24, 2016.
- [17] B. Hwang, S. Lee, Y. M. Kim, N. J. Kim, Analysis of inverse fracture occurring in hammer-impacted region during drop-weight tear test of a high-toughness linepipe steel, *Proceedings of The 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, May 25–30, 2003.
- [18] Y. Zheng, K. Chang-Boo, F. Yaorong, C. Chongdu, Abnormal fracture appearance in drop-weight tear test specimens of pipeline steel, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 483–484, pp. 239–241, 2008.

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن لوله فولادی API X65 و از آقای مهندس صادقی جهت همکاری در ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش تقدیر و تشکر می‌شود. هم چنین از مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران بدلیل تامین بخشی از هزینه‌های ساخت ماشین ضربه سقوطی در قالب طرح پژوهشی مشترک با دانشگاه بیرجند قدردانی می‌نماید.

## 8- مراجع

- [1] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, pp. 370-390, united states of America, McGraw-Hill, 1961.
- [2] J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, G. Yuan, H. Di, R. D. K. Misra, Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 666, pp. 214-224, 2016.
- [3] W. A. Maxey, Fracture initiation, Propagation and arrest, *Proceedings of the 5th Symposium on Line Pipe Research*, Houston, USA, November 20-22, 1974.
- [4] API Specification 5L/ISO 3183 (Modified), *Specification for Line Pipe*, 44th Edition, American Petroleum Institute (API), Washington DC, pp. 31-38, 2007.
- [5] API standard 1104, *Welding of pipelines and related facilities*, 21th Edition, American Petroleum Institute (API), Washington DC, pp. 66-89, 2013.
- [6] A. Cosham, D. G. Jones, R. Eiber, P. Hopkins, Don't drop the drop weight tear test, *Pipeline Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 69-84, 2010.
- [7] C. P. Reip, S. Shanmugam, R. D. K. Misra, High strength microalloyed CMn(V–Nb–Ti) and CMn(V–Nb) pipeline steels processed through CSP thin-slab technology: Microstructure, Precipitation and Mechanical Properties, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 424, No. 1-2, pp. 307-317, 2006.
- [8] B. Hwang, S. Lee, Y. M. Kima, N. J. Kima, J. Y. Yoo, C. S. Woo, Analysis of abnormal fracture occurring during drop-weight tear test of high-toughness line-pipe steel, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 368, ,