



عنوان پروژه :

یک تحقیق تجربی بر روی رفتار عمر خستگی اتصالات نقطه جوش شده

مجری :

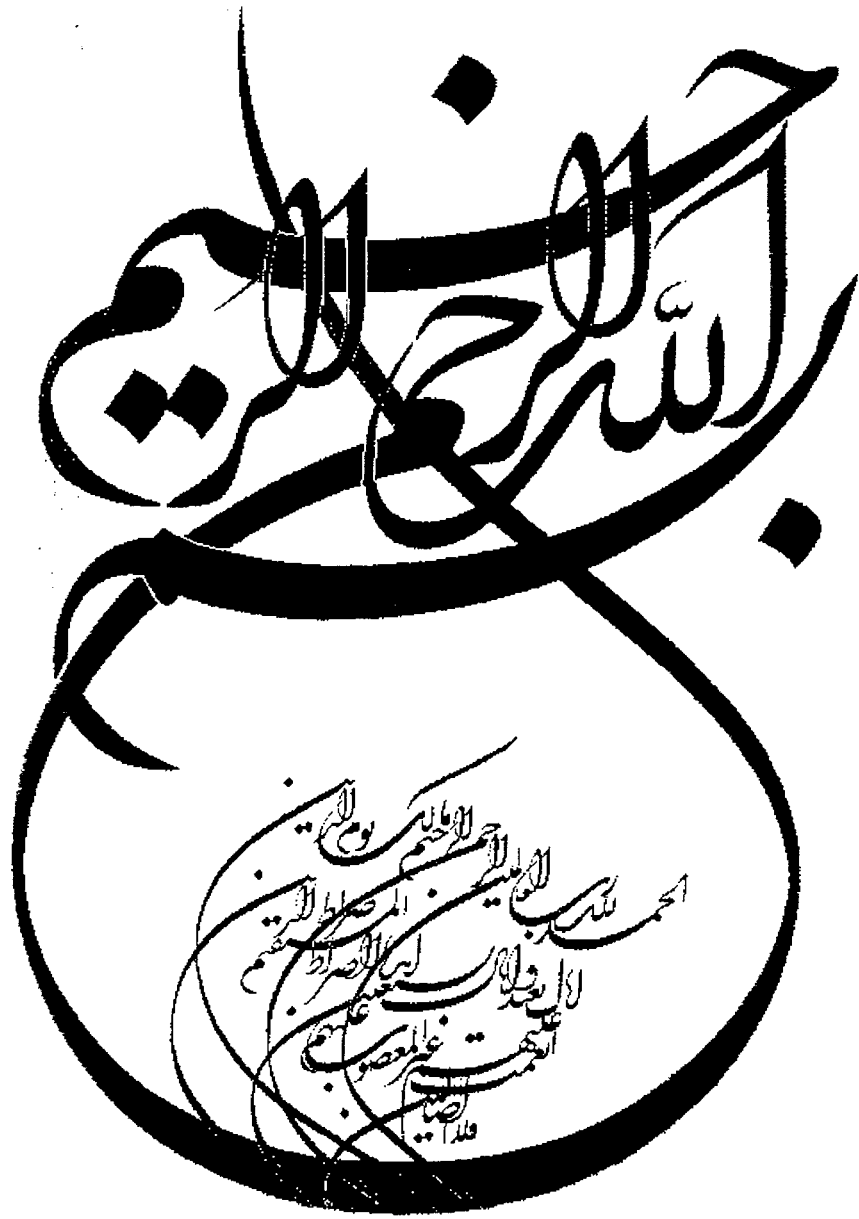
محمود شریعتی

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

پاییز ۱۳۸۶

این طرح با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است و تاریخ های تصویب و خاتمه آن به ترتیب ۸۵/۱۲/۶ و ۸۶/۸/۱۳ می باشد.



فهرست مطالب

.....	فصل اول : مقدمه	۱
.....	فصل دوم : جوشکاری مقاومتی	۶
.....	۱-۲ تئوری جوشکاری مقاومتی	۶
.....	۲-۲ اصول جوشکاری مقاومتی	۷
.....	۳-۲ بهینه سازی عوامل مؤثر بر جوشکاری مقاومتی	۱۱
.....	۴-۲ فرایندهای جوشکاری مقاومتی	۱۲
.....	۵-۲ جوشکاری نقطه ای	۱۲
.....	فصل سوم : تحقیق تجربی انجام شده بر روی نمونه های نقطه جوش شده نوع کششی-برشی (TS)	۱۹
.....	۱-۳ نتایج تجربی	۲۰
.....	۲-۳ آزمایشهای خستگی	۲۴
.....	۳-۳ بررسی رفتار رشد ترک خستگی	۲۷
.....	۴-۳ بحث و بررسی نتایج	۳۵
.....	۵-۳ نتایج	۳۹
.....	فصل چهارم : تحقیق تجربی انجام شده بر روی نمونه های نقطه جوش شده MCP	۴۰
.....	۱-۴ مقدمه	۴۰
.....	۲-۴ نتایج تجربی	۴۱
.....	۳-۴ نتایج آزمایشهای خستگی	۴۵
.....	۴-۴ بحث و بررسی	۵۵
.....	۵-۴ نتایج	۵۹
.....	فصل پنجم : تحقیق تجربی انجام شده بر روی نمونه های متقارن "U شکل"	۶۰
.....	۱-۵ مقدمه	۶۰
.....	۲-۴ نتایج تجربی	۶۰
.....	۳-۵ آزمایشهای خستگی	۶۳
.....	۴-۵ بررسی رفتار رشد ترک خستگی نسبت به تعداد سیکل بارگذاری	۷۱
.....	۵-۵ پیش بینی شروع انتشار ترک خستگی	۷۳
.....	۶-۵ بحث و بررسی نتایج	۷۹
.....	۷-۵ نتیجه گیری	۸۱

چکیده

در این تحقیق رفتار تجربی رفتار رشد ترک و طول عمر خستگی نمونه های نقطه جوش شده نوع کششی- برشی (TS) ، MCP(Modified Coach Peel) و U شکل مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا نمونه های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم (Mild Steel) با ابعاد مشخص و ضخامت های متفاوت ۱ و ۱/۵ میلیمتر و با شرایط معین به یکدیگر جوشکاری نقطه ای شده و سپس توسط یک دستگاه سرو هیدرولیک نوع INSTRON 8802 تحت بارگذاری متناوب با اندازه های مختلف ولی با دامنه ثابت و از نوع بار- کنترل قرار گرفتند. همزمان با بارگذاری، پس از جوانه زنی و رشد ترک، طول ترک تا زوال کامل با یک میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 100X اندازه گیری و ثبت می شد. نتایج تحقیق نشان می دهند که هر قدر سطح بارگذاری بیشتر باشد، طول عمر خستگی نمونه کاهش می یابد. همچنین جوانه زنی و رشد ترک همواره در نمونه با ضخامت کمتر زودتر اتفاق می افتد و طول ترک در آن بزرگتر است. اگر به ورق ها بار بیش از حد اعمال شود، بدون آنکه قادر باشند بارگذاری خستگی را تحمل کنند، ناگهان گسیخته می شوند و دکمه جوش از جای خود در می آید.

فصل اول

مقدمه

جوشکاری نقطه ای یکی از مرسومترین روش ها برای اتصال دو ورق به یکدیگر بوده و بویژه در صنایع اتومبیل سازی کاربرد فراوانی دارد. به همین دلیل سالیان متمادی است که مورد توجه محققین قرار گرفته است. اتصالات نقطه جوش شده، بخصوص اتصالاتی که در بدنه اتومبیل ها بکار رفته اند، همواره تحت تاثیر نیروهای دینامیکی و متغیر قرار دارند. لذا پدیده خستگی در آنها ایجاد می گردد. از طرفی پدیده خستگی موجب ایجاد ترک خستگی و کاهش شدید طول عمر مفید قطعات می شود. بنابراین باید بتوان ضمن تحلیل تنش دقیق اینگونه اتصالات، طول عمر باقیمانده آنها را نیز تخمین زد. در همین راستا پژوهشگران سعی کرده اند اینگونه اتصالات را با روش های تحلیلی، عددی و تجربی مورد بررسی و تحقیق قرار دهند.

بسیاری از محققین، استحکام نقطه جوش های واقع بر روی نمونه های با هندسه های مختلف که تحت اثر بارگذاری های متنوعی قرار داشته اند را مورد توجه قرار داده اند. به عنوان مثال، [1] Hartmann آزمایش های مکانیکی بر روی نقطه جوش ها را در حالت بارگذاری کششی-برشی، کشش مستقیم و پیچش انجام داد. [2] Vanden Bossche از یک روال پلاستیسیته به منظور تخمین استحکام نقطه جوش ها بر روی نمونه های برشی استفاده کرد. [3] Sawhill & Furr و [4] Ewing et al استحکام نقطه جوش ها را با توجه به

هندسه نمونه، پارامترهای جوشکاری، استحکام فلز پایه، سرعت جوشکاری و وضعیت جوشکاری مورد آزمایش قرار دادند. [5] Zuniga & Sheppard مدهای زوال نقطه جوش ها را بر روی نمونه های CP و TS در فولاد HSLA و تحت شرایط بارگذاری استاتیکی مورد مطالعه قرار دادند. [6] Lee et al یک روال تنشی را بکار گرفتند تا نتایج تجربی اشان را بر روی استحکام نقطه جوش ها در نمونه های U شکل و تحت ابرگذاری مرکب کششی و برشی مورد مطالعه قرار دهند. [7] Wung و [8] Wung et al یک معیار زوال را بر اساس نتایج تجربی اشان بر روی نمونه های با هندسه های مختلف پیشنهاد کردند.

همچنین عمر خستگی نقطه جوش ها توسط پژوهشگران زیادی بر روی انواع نمونه ها مورد توجه و تحقیق قرار گرفته است. به عنوان مثال، & Wang [10], Radaj [10], Davidson [9], Hartmann [1] , Sheppard [12], Swellam et al [13], Sheppard & Pan [14,18,19] و Ewing [11] و Zhang [15,20] در این خصوص تحقیقاتی را انجام داده اند. به منظور تحلیل نتایج تجربی برای نقطه جوش های تحت شرایط بارگذاری سیکلی، غالباً از روش مکانیک شکست برای بدست آوردن ضریب شدت تنش حداکثر نقاط بحرانی نقطه جوش ها استفاده می شود.

[16] Pook حلی برای تعیین ضریب شدت تنش حداکثر برای نقطه جوش های واقع در نمونه های نوع TS و CP و فنجانی ارائه داد. [13] Swellam et al یک اندیس تنشی K_I از طریق اصلاح حل مربوط به تعیین ضریب شدت تنش ارائه داد تا نتایج تجربی اشان را برای انواع نمونه های نقطه جوش تعمیم دهند. [15] Zhang حلی را برای تعیین ضریب شدت تنش نقطه جوش ها در انواع مختلف نمونه ها ارائه داد تا نتایج تجربی نقطه جوش ها تحت شرایط بارگذاری سیکلی را در این نمونه ها اعمال کند. [17,21] Newman & Dowling حل کلی Pook برای ضریب شدت تنش را بکار گرفتند تا مدلی را برای پیش بینی عمر خستگی نقطه جوش ها در نمونه های نوع TS ارائه دهند.

نتایج تجربی در تحلیل و مدلسازی رفتار نقطه جوش توسط مفاهیم مکانیک شکست، نقش مهمی ایفا می کنند. زیرا نتایج حاصل از مدل ها باید با نتایج تجربی مطابقت داشته باشد؛ در غیر این صورت مدلها قابل اعتماد نمی باشند. از جمله تحقیقاتی که در آنها آزمایشات تجربی بر روی انواع نمونه های نقطه جوش شده انجام شده است، می توان به مقالات زیر اشاره کرد. Adib H و همکارانش [22] با استفاده از روش حجمی (Volumetric Method) به پیش بینی طول عمر خستگی نقطه جوش ها پرداخته اند. Xin Sun و

همکارانش [23] تاثیرات اندازه منطقه ذوب و مد زوال را بر روی بار حداکثر و میزان جذب انرژی فولادهای پراستحکام مورد بررسی قرار داده اند. Xin Long و همکارانش [24] بر روی خواص خستگی و مشخصه های زوال ورق های پراستحکام نقطه جوش شده پژوهش کرده اند. Byoung-Ho Choi و همکارانش [25] بر روی طول عمر خستگی ورق های فولادی نقطه جوش شده سه تایی (سه ورق روی یکدیگر) تحقیق کرده اند. S.-H. Lin و همکارانش [26] بر روی مدلسازی رشد ترک خستگی نقطه جوش ها تحت شرایط بارگذاری سیکلی مطالعه کرده اند. Ning Pan و همکارش [27] در مورد پیش بینی طول عمر خستگی نقطه جوش ها تحت محدوده کرنش سیکلی تحقیق نموده اند. [28] Hong Tae Kang در خصوص پیش بینی طول عمر خستگی اتصالات نقطه جوش شده با استفاده از روش تنش ساختاری معادل مطالعه کرده اند. P.-C. Lin و همکارانش [29] در مورد زوال نقطه جوش ها با در نظر گرفتن حالت تنش صفحه ای تحقیق کرده اند.

مراجع

- 1- Hartmann. E. C.. 1958. *Mechanical Tests of Spot Welds*. *Welding Journal*. Vol. 37. pp. 520-s-523-s.
- 2- VandenBossche, D. J.. 1977. *Ultimate Strength and Failure Mode of Spot Welds in High Strength Steels*. SAE Technical Paper No. 770214. Society of Automotive Engineers, Warrendale. Pennsylvania.
- 3- Sawhill. J. M. and Furr. S. T., 1981. *Spot Weldability Tests for High-Strength Steels*. SAE Technical Paper No. 810352, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania
- 4- Ewing. K.. W.. Cheresch, M., Thorripson. R. and ICukuchek:, P., 1982. *Static and Impact Strengths of Spot Welded HSLA and Low Carbon Steel Joints*. SAE Technical Paper No- 820281. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania.
- 5- Zuniga. S. and Sheppard, S. D., 1997- *Resistance Spot Weld Failure Loads and Modes in Overload Conditions*- Fatigue and Fracture Mechanics, ASTM STP 1296. Piascik,
- 6- Lee, Y.-L.. Wehner, T. J., Lu, M.-W., Morrissett. T. W. and Pakalnins, E.. 1998. *Ultimate Strength of Resistance Spot Welds Subjected to Combined Tension and Shear*. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 26, pp. 213-219.
- 7- Wung. P., 2001. A Force-based Failure Criterion for Spot Weld Analysis. *Experimental Mechanics*. Vol. 41. pp. 107-1 13.
- 8- Wung. P.. Walsh, T., Ourchane, A.. Stewai-t. W. and Jie, M., 2001. *Failure of Spot Welds under In-plane Static Loading*. *Experimental Mechanics*. Vol. 41. pp. 100-106-
- 9- Davidson. J. A.. 1983. *A Review of the Fatigue Properties of Spot-Welded Sheet Steels*. SAE Technical Paper No. 830033. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania.
- 10- Radaj, D., 1989. *Stress Singularity, Notch Stress and Structural Stress at Spot-Welded Joints*. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol- 34-, pp. 495-506.

- 11- Wang, P.-C- and Ewing, K. \V., 1991. *Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Resistance of Spot Welded Coach-Peel Joints*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 14. pp. 913-930. Swellai-n, M. H., Banas. O. and Lawrence. F. V., 1994. *A Fatigue Design Parameter for Spot Welds*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures. Vol. 17. pp. 1197-1204.
- 13- Sheppard, S. D. and Pan. N.. 2001. *A Look at Fatigue: Is Resistance Spot Welds-Notch or Crack.? SAE Technical Paper No. 2001-01-0433*, Society of Automotive Engineers. Warrendale. Pennsylvania.
- 14- Zhang. S.. 2001. Recent Developments in Analysis and Testing of Spot Welds- SAE Technical Paper No. 2001-01-0432, Society of Automotive Engineers, Warrendale. Pennsylvania
- 15- Pook. L. P., 1975. *Fracture Mechanics Analysis of the Fatigue Behavior of Spot Welds*. International Journal of Fracture. Vol. I I, pp. 173-176.
- 16- Pook, L. P.. 1979- Approximate Stress Intensity Factors Obtained from Simple Plate Bending Theory. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 12, pp. 505-522.
- 17- Newman. J. A. and Dowling, N. E, 1998. *A Crack. Growth Approach to Life Prediction of Spot-Welded Lap Joints*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 21. pp. 1 123-1 132-
- 18- Sheppard, S., 1993. *Estimation of Fatigue Propagation Life in Resistance Spot Welds*. ASTM STP 1211, Mitchell, M. R. and Landgraf, W. C., Eds.. American Society for Testing and Materials, pp. 169-185
- 19- Pan, N. and Sheppard, S., 2002. *Spot Welds Fatigue Life Prediction with Cyclic Strain Range*. International Journal of Fatigue, Vol. 24, pp. 519-528.
- 20- Zhang, S.. 1997- Stress Intensities at Spot Welds- International Journal of Fracture. Vol. 88, pp- 167-185.
- 21- R- S-. Newman, J. C. and Dowling. N- E., Eds-, *American Society for Testing and Materials*, pp. 469-489-
- 22- Adib H, Gilgert J, Pluvinage G. **Fatigue life duration prediction for welded spots by volumetric method.** *Int J Fatigue* 2004;26:81–94.
- 23- Xin Sun, Elizabeth V. Stephens, Mohammad A. Khaleel, **Effects of Fusion Zone Size and Failure Mode on Peak Load and Energy Absorption of Advanced High Strength Steel Spot Welds under Lap Shear Loading Conditions**, *Engineering Failure Analysis*, Accepted Date: 22 January 2007
- 24- Xin Long, Sanjeev K. Khanna, **Fatigue properties and failure characterization of spot welded high strength steel sheet**, *International Journal of Fatigue* 29 (2007) 879–886
- 25- Byoung-Ho Choi a,* , Dong-Ho Joo b, Sam-Hong Song, **Observation and prediction of fatigue behavior of spot welded joints with triple thin steel plates under tensile-shear loading**, *International Journal of Fatigue* 29 (2007) 620–627
- 26- S.-H. Lin a, J. Pan a,* , P. Wung b, J. Chiang, **A fatigue crack growth model for spot welds under cyclic loading conditions**, *International Journal of Fatigue* 28 (2006) 792–803

- 27- Ning Pan *, Sheri Sheppard, **Spot welds fatigue life prediction with cyclic strain range**, *International Journal of Fatigue* 24 (2002) 519–528
- 28- Hong Tae Kang, **Fatigue prediction of spot welded joints using equivalent structural stress**, *Materials and Design* xxx (2005) xxx–xxx
- 29- P.-C. Lin, S.-H. Lin, J. Pan, **Modeling of failure near spot welds in lap-shear specimens based on a plane stress rigid inclusion analysis**, *Engineering Fracture Mechanics* 73 (2006) 2229–2249

فصل دوم

آشنایی با جوشکاری مقاومتی

۱- تئوری جوشکاری مقاومتی

در جوشکاری مقاومتی برای ایجاد اتصال از فشار و گرما، هر دو استفاده می شود. گرما به خاطر مقاومت قطعات کار و تماس آنها در فصل مشترک در مقابل عبور جریان برق بوجود می آید. برای نگهداشتن دو قطعه کار، فشار مشخصی بر آنها اعمال می شود و به این ترتیب مقاومت برقی محل فصل مشترک نیز کنترل می گردد. پس از رسیدن دما به حد مطلوب می توان بر مقدار فشار افزود تا مختصری سیلان پلاستیکی ایجاد و به اتصال کمک شود.

چون در این جوشکاری از فشار استفاده می شود، دمای لازم برای اتصال پایین تر از دمای آمیزش برفی و جوشکاری با شعله گاز است. در نتیجه در تمام روشهای جوشکاری مقاومتی، به استثنای جوشکاری ضربه ای که کاربرد چندانی هم ندارد، فلز ذوب نمی شود. بنابراین، این فرایندها اساسا فرایندهای حالت جامد هستند. علاوه بر فشار لازم برای اتصال، بلافاصله پس از آن می توان فشار اضافی اعمال نموده تا قدری عمل فورجینگ صورت گیرد. همچنین می توان برای تاباندن و یا رفع تنش حرارتی در قطعه، به عنوان قسمتی از فرایند، گرمای اضافی نیز اعمال کرد. از آنجا که می توان سرعت به دمای لازم رسیده

کار از تایمرهای الکترونیکی سینکرونیزه قابل تنظیم استفاده می شود که جریان را هماهنگ با ولتاژ قطع و وصل می کند. به این ترتیب از جریانهای گذاری شدیدی که می تواند به الکترودها و قطعات اتصالی دستگاه آسیب برساند و موجب ایجاد جوش غیر یکنواخت شود، جلوگیری می شود.

۲-۱-۲ منبع تغذیه

مقدار جریان مورد نیاز برای جوشکاری مقاومتی آنقدر زیاد است که برای کاهش بار وارد بر خط انتقال، در بیشتر ماشینها از مدارهای مخصوص استفاده می شود. مدارهای تکفاز فقط در ماشینهای کوچک مورد استفاده قرار می گیرد. این منابع برای فلزاتی مانند فولاد کم کربن، فولاد زنگ نزن، و آلیاژهای نیکل خوب کار می کنند. گرما برحقی در سطوح تماس متمرکز شده و قبل از آنکه مقدار معتابهی کرما به سطوح مجاور منتقل شود، حالت خمیری ایجاد می شود. فلزاتی مانند آلومینیوم که قابلیت هدایت حرارتی بالا و مقاومت کمی دارند، به جریانهای بسیار بالایی احتیاج دارند تا مقدار افت حرارتی درون ورقها را جبران نمایند.

در ماشینهای بزرگتر معمولا از مدارهای سه فاز استفاده می شود. بیشتر ماشینهای جوشکاری جدید از جریان مستقیم یکسو شده از منبع سه فاز بوسیله یکسوکننده های صفحه خشک، استفاده می کنند. این ماشینها جریان هر فاز را کاهش داده بار را متعادل می کنند و جوشهای مرغوب تولید می نمایند.

۲-۲ فشار

در تهیه یک جوش مقاومتی به دو سری فشار نیاز داریم که عبارتند از: **فشار جوش و فشار چکش**. فشار جوش، فشاری است که الکترودها در حین عبور جریان از منطقه مورد نظر بر قطعات کار وارد می کنند و آنها را در همان حال نگه می دارند. فشار چکشی، معمولا به محض اینکه قطعات کار به حالت خمیری خود برسند، جریان جوشکاری قطع شده و در زیر فشار چکشی الکترودها بهم فشار داده می شوند. این فشار تا زمان کوتاهی که در واقع زمان جامد شدن جوس می باشد، ادامه خواهد داشت. پس از تکمیل جوش، فشار مزبور از روی الکترودها برداشته می شود و قطعه را خارج می کنند.

بطور کلی در جوشکاری مقاومتی، فشار بر مقاومت تماس تاثیر دارد و باعث می شود که بتوان جوشکاری را در دمای پایینتری انجام داد، از اینرو کنترل اندازه و زمان آن بسیار اهمیت دارد. اگر فشار خیلی کم باشد، مقاومت تماس بالا رفته و سطح تماس الکترودها سوخته و خال می افتد. از طرفی اگر فشار خیلی زیاد باشد، ممکن است فلز مذاب یا نرم شده و از بین صفحات در حال تماس بیرون بزنند، یا قطعه کار

درمحل الکترودها فرو رفته شود. حالت مطلوب این است که فشار مناسب پیش از برقراری جریان و در زمان عبور جریان بر قطعه کار وارد گردد، تا مقاومت مناسب بین سطوح تماس ایجاد گردد. سپس بلافاصله پس از رسیدن دما به حد مناسب، باید فشار به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یابد تا عمل آمیزش کامل شده، و نیز تا حدی آهنگری صورت گیرد و ساختمان ریز دانه تشکیل شود.

در ماشینهای کوچک پدالی، فشار فقط توسط یک فنر کنترل شده و اندازه آن ثابت است. در ماشینهای بزرگتر، معمولاً فشار از طریق سیلندره‌های هیدرولیک یا پنوماتیک اعمال می شود و زمان آن بطور خودکار کنترل می شود.

۴-۲ زمان

در خلال هر سیکل جوشکاری، چه برای کار با ماشینهای خودکار چه با ماشینهای دستی، چهار فاصله زمانی را باید مدنظر داشت که عبارتند از:

- الف) زمان جوشکاری: به فاصله زمانی اطلاق می شود که جریان برق در مدار جاری باشد.
- ب) زمان فشرده شدن قطعات به یکدیگر: فاصله زمانی است که در اثر فشار الکترودها قطعات به یکدیگر فشرده می شود.
- ج) زمان نگهداری قطعات: به فاصله زمانی گفته می شود که در طی آن جوش در حال خنک شدن میباشد.
- د) زمان خاموشی: پس از خنک شدن جوش، فاصله زمانی بین آزاد شدن الکترودها و آغاز سیکل بعدی، زمان خاموشی دستگاه نامیده می شود.

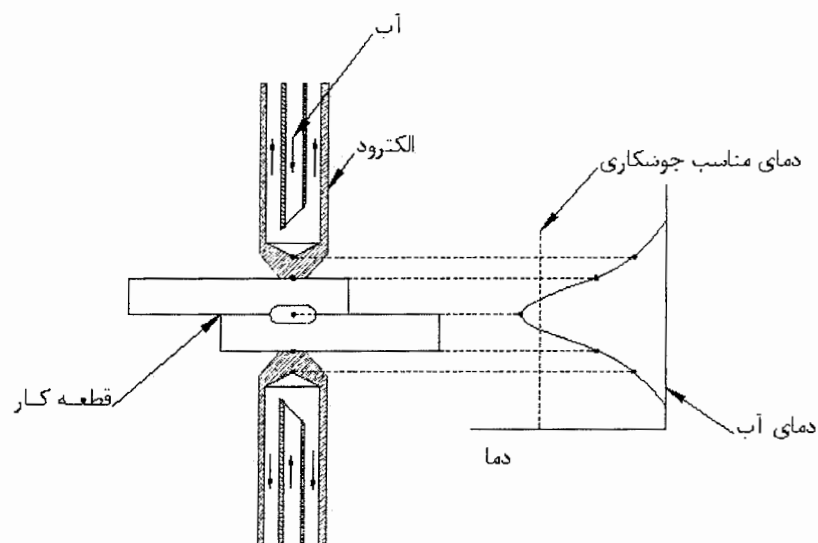
۴-۲ مقاومت سطوح تماس بین الکترودها

اندازه جوش بوسیله مقاومت سطوح تماس بین الکترودها کنترل می شود. این مساحت را می توان متناسب با نیازهای هر کار و با استفاده از زوج الکترودهای گوناگون بدلیخواه تغییر داد.

بطور کلی مقاومت مجموعه بین الکترودها از سه قسمت تشکیل شده است:

- (۱) مقاومت قطعات
- (۲) مقاومت تماس بین الکترودها و قطعه کار
- (۳) مقاومت بین سطوح در حال تماس دو قطعه کار

از آنجا که هدف ایجاد حداکثر دما در نقطه تماس دو قطعه کار در محل جوشکاری است، باید مقاومت‌های (۱) و (۲) حتی الامکان در مقایسه با مقاومت (۳) پایین نگهداشته شوند. مقاومت قطعه کار تابع جنس و ضخامت فلز است. این مقاومت معمولاً از دو مقاومت دیگر بسیار کمتر است، زیرا سطح قطعه کار بزرگ بوده و اصولاً قابلیت هدایت اکثر فلزات خوب است. مقاومت بین الکترودها و قطعه کار را می‌توان با انتخاب الکترودی از جنس فلزاتی که هادی بسیار خوب برق هستند، کنترل شکل و اندازه الکترودها، و استفاده از فشار مناسب بین الکترودها و قطعه کار، پایین نگهداشت. از آنجا که تغییر فشار موجود بین الکترودها و قطعه کار موجب تغییر فشار بین سطوح تماس دو قطعه کار نیز می‌شود، واضح است که کنترل هدایت از این طریق نسبتاً محدود است. مقاومت بین سطوح تماس تابع کیفیت سطوح، وجود زنگار غیر هادی، گرد و خاک و آلودگی‌های دیگر، فشار و مساحت سطح تماس است. در نتیجه برای اینکه کار یکنواخت باشد، لازم است این عوامل کنترل شوند. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، هدف رساندن سطوح تماس به دمای بالا و مناسب جوشکاری بطور همزمان و در عین حال نگهداشتن الکترودها و بقیه قسمت‌های کار در دمایی بسیار پایینتر است. معمولاً الکترودها را با آب سرد می‌کنند تا دمای آنها پایین نگهداشته شود و سالم بمانند. در مواردی که فلزات جوش دادنی ضخامت متفاوت یا هدایت برقی متفاوت دارند، می‌توان الکتروود طرف فلز با ضخامت یا مقاومت بیشتر را به گونه‌ای انتخاب کرد که هدایتش از الکتروود طرف دیگر بیشتر باشد، تا هر دو قطعه بطور همزمان به دمای مناسب برسند.



شکل ۱ - شماتیک نحوه عملکرد جوشکاری نقطه‌ای (مقاومتی)

۲- بهینه سازی عوامل مؤثر بر جوشکاری مقاومتی

تعیین مناسب عوامل مؤثر بر جوشکاری مقاومتی مسئله ای بسیار پیچیده است. تغییر ناچیزی در یکی از این پارامترها بر دیگر پارامترها تاثیر خواهد گذاشت. این مسئله و این واقعیت که سطح تماس الکتروود بتدریج افزایش می یابد، طراحی جدول عوامل بهینه و مؤثر بر جوشکاری مقاومتی را با مشکل روبرو می کند، جدولی که پارامترهای بهینه در شرایط مختلف را نشان دهد. در جدول (۱) مقادیر بهینه عوامل مؤثر بر جوشکاری مقاومتی (خصوصاً جوش نقطه ای) ارائه شده است.

جدول (۱): مقادیر بهینه عوامل مؤثر بر جوشکاری نقطه ای مقاومتی

ضخامت ورقه t، ها (mm)	نیروی الکتروود، F (kN)	جریان جوش، I (A)	زمان جوش (cycles)	زمان نگهداری (cycles)	قطر الکتروود، d (mm)
0.63 + 0.63	2.00	8 500	6	1	6
0.71 + 0.71	2.12	8 750	7	1	6
0.80 + 0.80	2.24	9 000	8	2	6
0.90 + 0.90	2.36	9 250	9	2	6
1.00 + 1.00	2.50	9 500	10	2	6
1.12 + 1.12	2.80	9 750	11	2	6
1.25 + 1.25	3.15	10 000	13	3	6 - 7
1.40 + 1.40	3.55	10 300	14	3	6 - 7
1.50 + 1.50	3.65	10 450	15	3	6 - 7
1.60 + 1.60	4.00	10 600	16	3	6 - 7
1.80 + 1.80	4.50	10 900	18	3	6 - 7
2.00 + 2.00	5.00	11 200	3x7+2	4	7 - 8
2.24 + 2.24	5.30	11 500	3x8+2	4	7 - 8
2.50 + 2.50	5.60	11 800	3x9+3	5	8
2.80 + 2.80	6.00	12 200	4x8+2	6	8
3.00 + 3.00	6.15	12 350	4x9+2	6	8
3.15 + 3.15	6.30	12 500	4x9+2	6	8

۴- فرایندهای جوشکاری مقاومتی

در صنایع امروزی از روشهای متعددی بر پایه اصول یاد شده در بالا استفاده می شود. در زیر برخی از روشهایی را که در صنعت کاربرد وسیعی دارند، نام برده شده اند:

(۱) جوشکاری نقطه ای (spot welding)

(۲) جوشکاری درزی (seam welding)

(۳) جوشکاری برجسته (projection welding)

در ادامه به توضیح روش جوشکاری نقطه ای پرداخته می شود.

۵- جوشکاری نقطه ای

جوشکاری نقطه ای ساده ترین و پر مصرف ترین نوع جوشکاری مقاومتی است. برای این جوشکاری از الکترودهایی استفاده می شود که سطح مقطع آنها درنوک الکتروود کمتر از جاهای دیگر است و با آب سرد می شوند. قطر جوش معمولاً بین ۱/۱۶ تا ۱/۲ اینچ است. پس از قرار دادن کار در محل مناسب، الکترودها روی کار قرار گرفته و سیکل کنترل شده فشار و جریان برقرار می شود. سپس الکترودها باز شده و کار از بین آنها بیرون آورده می شود. در یک جوش نقطه ای که در شکل (۳) مشاهده می شود، دکمه (nugget) فلز در هم آمیخته بدون ذوب فلز بین دو صفحه در حال تماس ایجاد می شود. فرورفتگی فلز در زیر الکتروود باید ناچیز باشد.

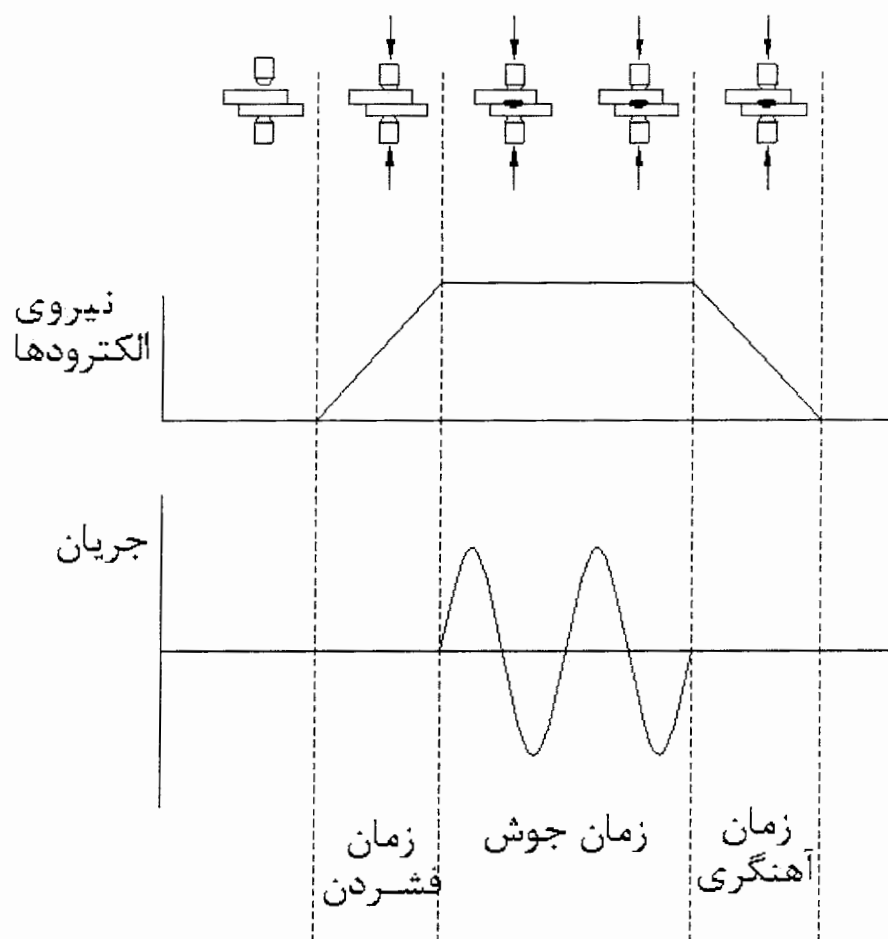
۱-۵ ترتیب جوشکاری نقطه ای

- ترتیب جوشکاری نقطه ای می تواند تغییر کند اما ساده ترین آن به شرح زیر است (شکل ۲):
- الف) اتصال بین الکترودها قرار داده می شود. به منظور تامین وضعیت صحیح جوش، باید دقت شود قطعه کار با الکترودها هم محور باشد. برای این منظور، در صورتی که بخواهیم تعداد زیادی از این نقطه جوشها ایجاد نماییم از کار گیر (فیکسچر) استفاده می شود.
- ب) عملیات جوشکاری معمولاً با بکار اندازی یک پدال یا یک کلید پایی شروع می شود.
- ج) الکترودها بسته شده و قطعه کار را فشار می دهند تا ورقها در تماس نزدیک قرار گیرند.
- د) فشار تا میزان بهینه آن برای مدت زمانی که به عنوان زمان فشرده شدن خوانده می شود، افزایش می یابد.

ه) جریان برقرار شده و اجازه داده می شود برای مدت از قبل تعیین شده ای جریان یابد تا اینکه فلز به حالت خمیری شود و جوش تا اندازه مورد نظر بزرگ شود. بطور کلی، زمانهای جوشکاری در حد شایان توجهی از یک ثانیه کمتر است و برحسب سیکل بیان می گردد. یک سیکل معادل $1/50$ ثانیه یعنی عکس فرکانس در استاندارد انگلستان است به عنوان مثال برای یک ورق فولادی (ضخامت بین 0.6 تا 1 میلیمتر) زمان بین 5 تا 20 سیکل می باشد.

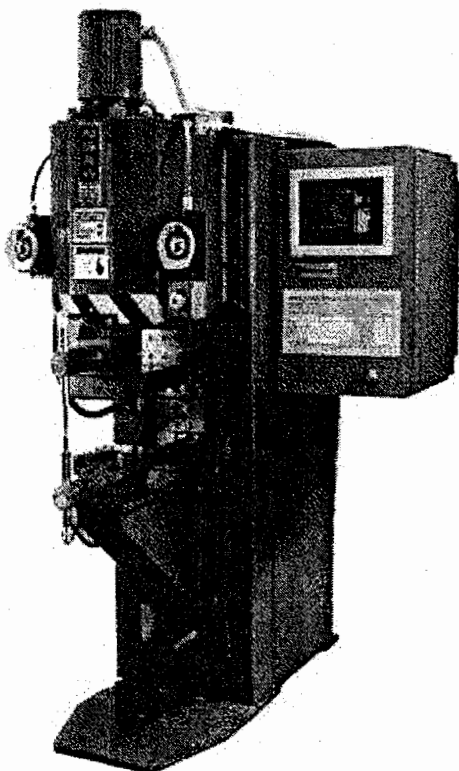
و) هنگام انجام جوش، به منظور عمل آهنگری (فورجینگ) فشار روی الکترودها برای مدتی حفظ می شود.

ز) در پایان، فشار برداشته می شود، الکترودها از هم جدا شده و قطعه کار از روی ماشین برداشته می شود.

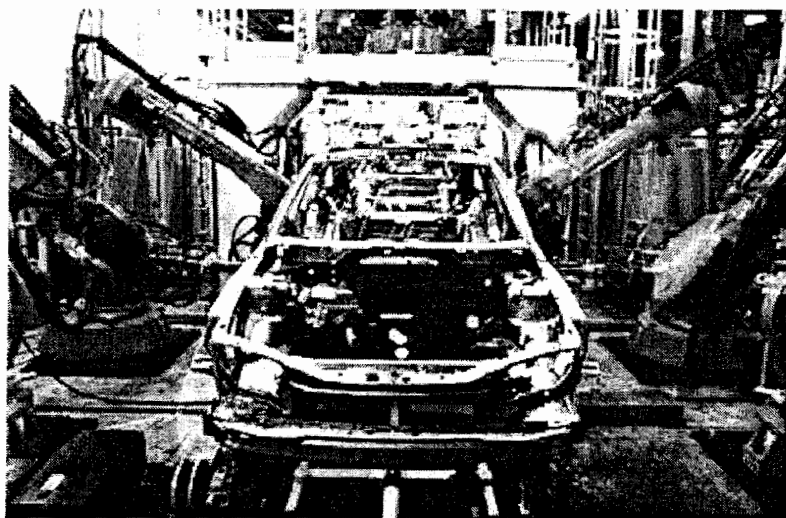


شکل ۲: نمونه ای از دوره جوشکاری نقطه ای

مواردی که کار تکراری وجود دارد، دستگاههای با سیلندر پنوماتیک، فشارهای بیشتری تولید نموده و خستگی جوشکار را کاهش می دهد. با این ابزار می توان تا ۲۰۰ جوش نقطه ای در دقیقه انجام داد. نمونه ای از این دستگاهها در شکل (۶) مشاهده می شود.



شکل ۵: دستگاه جوش نقطه ای با سیلندر هیدرولیکی



شکل ۶: دستگاههای جوش نقطه ای مورد استفاده در خودروسازی

۴-۵ فلزات مناسب برای جوشکاری نقطه ای

یکی از امتیازات واقعی جوش نقطه ای امکان انجام بر روی تقریباً تمامی فلزات تجارتي است. بیشتر این فلزات را می توان با جوشکاری نقطه ای به یکدیگر جوش داد. فقط در موارد کمی، جوش ترد می شود. جدول (۲) نمایشگر ترکیب فلزاتی است که می توان به یکدیگر جوش نقطه ای داد.

با اینکه بیشتر جوشکاری های نقطه ای بر روی ورقه های فلزی انجام می شود، فلزات به شکل های دیگر را نیز می توان جوش نقطه ای داد. ورقه های فلزی را می توان به قطعات نورد شده یا قطعات ریختنی و برخی انواع قطعات ریخته گری حديدی ای، جوش نقطه ای داد. به استثنای آلومینیوم، بیشتر فلزات نیازی به آماده سازی قبلی ندارند و فقط باید اطمینان حاصل کرد که سطوح جوش دادنی بدون زنگ زدگی و خالی از حفره باشند. در مورد آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم برای بدست آوردن بهترین نتیجه باید قطعات را درست پیش از جوشکاری با وسایل شیمیایی یا مکانیکی تمیز کرد. سطح فلزاتی که قابلیت هدایت بالایی دارند، باید کاملاً تمیز باشد تا مقاومت محل اتصال الکتروود به سطح کار پایین آمده و دمای کافی در خود فلز ایجاد شود. به علت پایین بودن مقاومت برقی و بالا بودن هدایت حرارتی مس خالص، انجام جوش نقطه ای بر روی آن دشوار است. البته بسیاری از آلیاژهای مس را می توان براحتی جوش نقطه ای داد. در این موارد سرد کردن نواحی اطراف نقطه جوش با آب به ایجاد دمای مناسب در محل جوشکاری کمک می کند.

جدول (۲) : ترکیب فلزات قابل اتصال به یکدیگر با جوش نقطه

فلز	آلومینیوم	مس	آهن	آهن گالوانیزه	مونل	نیکل	ورشو	نیکرم	فولاد	آهن سفید	روی
آلومینیوم	*										
برنج		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
مس		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
آهن گالوانیزه		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
آهن		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
مونل		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
نیکل		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ورشو		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
نیکرم		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
فولاد		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
آهن سفید		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
روی	*	*	*								*

حد عملی ضخامت ورقه های هم ضخامتی را که می توان طی فرایند های معمولی جوشکاری نقطه ای بهم متصل کرد، حدود ۱/۸ اینچ است، ولی براحتی می توان یک ورقه ضخیم تر از ۱/۸ اینچ را جوش داد. اخیراً ورقه های فولادی ۱/۲ اینچی را نیز بجای پیچ و مهره با جوش نقطه ای بهم متصل نموده اند.

فصل سوم

تحقیق تجربی انجام شده بر روی نمونه های نقطه جوش شده نوع کششی- برشی (TS) به منظور بررسی رفتار رشد ترک و تعیین طول عمر خستگی

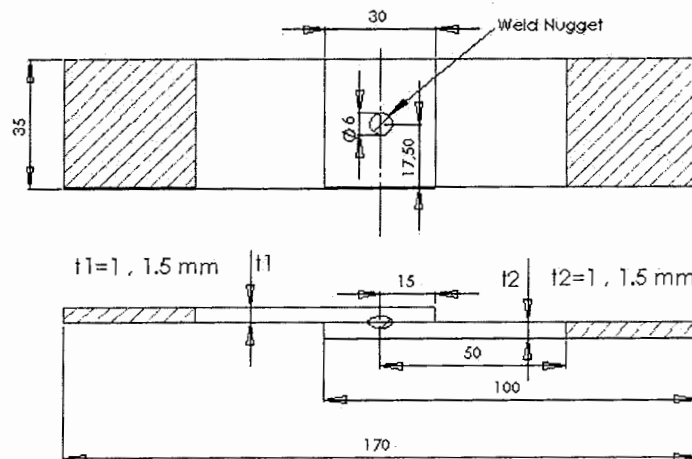
هدف از این تحقیق بررسی تجربی رفتار رشد ترک و طول عمر خستگی نمونه های نقطه جوش شده نوع کششی- برشی (TS) می باشد. در این تحقیق، ابتدا نمونه های TS از جنس فولاد نرم (Mild Steel) با ابعاد مشخص و ضخامت های متفاوت ۱ و ۱/۵ میلیمتر و با شرایط معین به یکدیگر جوشکاری نقطه ای شده و سپس توسط یک دستگاه سروهیدرولیک نوع INSTRON 8802 تحت بارگذاری متناوب با اندازه های مختلف ولی با دامنه ثابت و از نوع بار-کنترل قرار گرفتند. همزمان با بارگذاری، پس از جوانه زنی و رشد ترک، طول ترک تا زوال کامل با یک میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 100X اندازه گیری و ثبت می شد. نتایج تحقیق نشان می دهند که هر قدر سطح بارگذاری بیشتر باشد، طول عمر خستگی نمونه کاهش می یابد. همچنین جوانه زنی و رشد ترک همواره در نمونه با ضخامت کمتر زودتر اتفاق می افتد و طول ترک در آن بزرگتر است. اگر به ورق ها بار بیش از حد

اعمال شود، بدون آنکه قادر باشند بارگذاری خستگی را تحمل کنند، ناگهان گسیخته می شوند و دکمه جوش از جای خود در می آید.

۱-۳ نتایج تجربی

• نمونه‌های آزمایش

در این تحقیق از سه نوع نمونه TS (Tensile Shear) با ضخامت‌های متفاوت استفاده شد. ابعاد نمونه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های TS با ورق‌های با ضخامت ۱ mm به ۱ mm، ۱ mm به ۱٫۵ mm، و ۱٫۵ mm به ۱٫۵ mm به یکدیگر نقطه جوش شده‌اند. تعداد هر نوع نمونه آزمایش شده حداقل ۵ عدد بود که تحت شرایط مختلف بارگذاری با دامنه ثابت مورد آزمایش قرار گرفتند. عمر خستگی نمونه‌ها از ۱۰،۰۰۰ تا ۱،۰۰۰،۰۰۰ سیکل تغییر می‌کرد.



شکل ۱- هندسه و ابعاد نمونه‌های TS نقطه جوش شده

• شرایط جوشکاری نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایش با استفاده از یک دستگاه جوش نقطه ای پدالی آماده شده است. شرایط جوشکاری

به شرح زیر می باشد:

جریان جوشکاری: ۸kA.

زمان نگهداری: ۳ ثانیه

قطر الکترود: ۶-۵/۶ mm

• نامگذاری نمونه های آزمایش

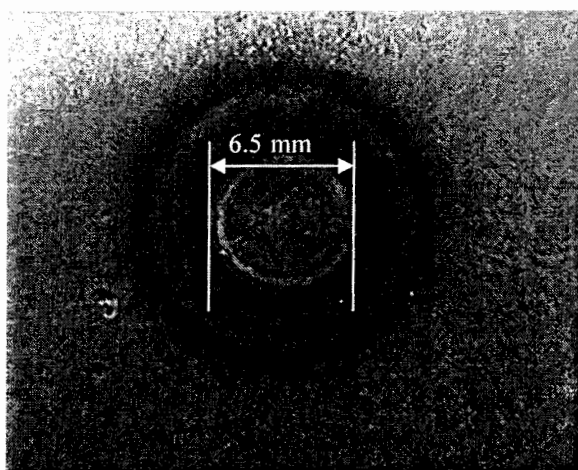
با توجه به استفاده از ورقه های با دو ضخامت متفاوت، نمونه های TS به چهار گروه مختلف تقسیم می شود. نمونه ها بصورت *-*-*-*TS نشان داده می شوند. TS به نوع نمونه اشاره دارد. عدد اول از سمت چپ اندازه ضخامت یکی از ورقها می باشد (که در عدد ۱۰ ضرب شده است) و عدد دوم از سمت چپ اندازه ضخامت ورق دیگری می باشد (که در ۱۰ ضرب شده است). عدد سوم به شماره قطعه در هر سری اشاره دارد. در این آزمایش هر سری از نمونه ها شامل حداقل سه نمونه بود.

• استحکام برشی نقطه جوش

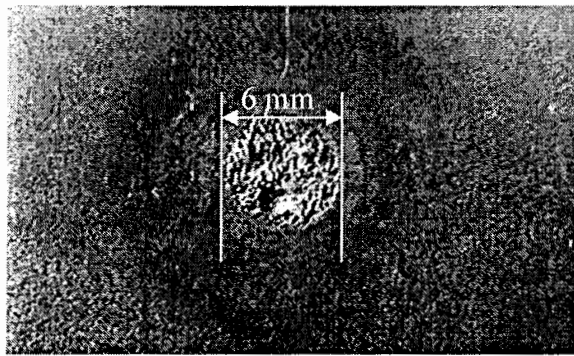
قطر نقطه جوش (Nugget) برابر ۶ میلیمتر بود که در شکل (۲) نشان داده شده است. هر سه نوع نمونه پس از اینکه نقطه جوش شدند، تحت آزمایش کشش قرار گرفتند و استحکام برشی نقطه جوش ها اندازه گیری شدند. استحکام برشی متوسط (حداکثر نیروی برشی قابل تحمل توسط نقطه جوش) نمونه ها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): استحکام تسلیم نمونه ها

نوع نمونه TS	استحکام کششی (N)
۱ mm-۱ mm	۵۵۴۰
۱ mm - ۱/۵ mm	۶۶۵۰
۱/۵ mm - ۱/۵ mm	۹۲۰۰

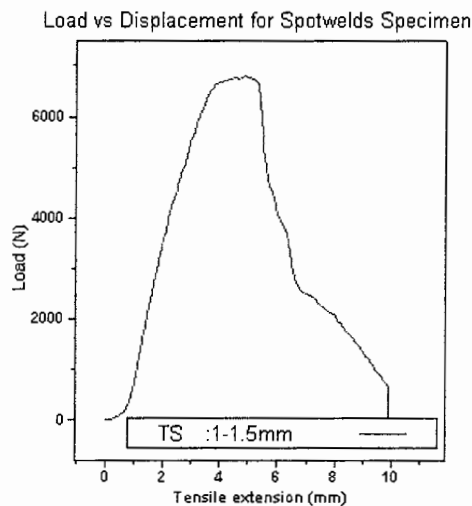


شکل ۲ (الف) - مقطع نقطه جوش در سطح ورق (قطر الکتروود برابر ۶,۵ mm است)



شکل ۲(ب) - سطح مقطع نقطه جوش پس از شکست در بارهای زیاد (قطر نقطه جوش در بین دو ورق تقریباً برابر ۶ میلی‌متر است)

یکی از نمودارهای مربوط به اندازه‌گیری استحکام برشی نقطه جوش در شکل (۳) نشان داده شده است.

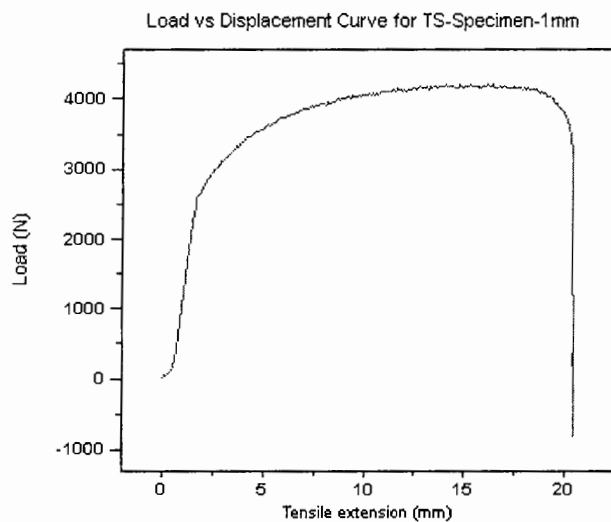


شکل ۳ - نمودار نیرو بر حسب جابجایی نمونه نقطه جوش شده برای 1-1,5mm TS :

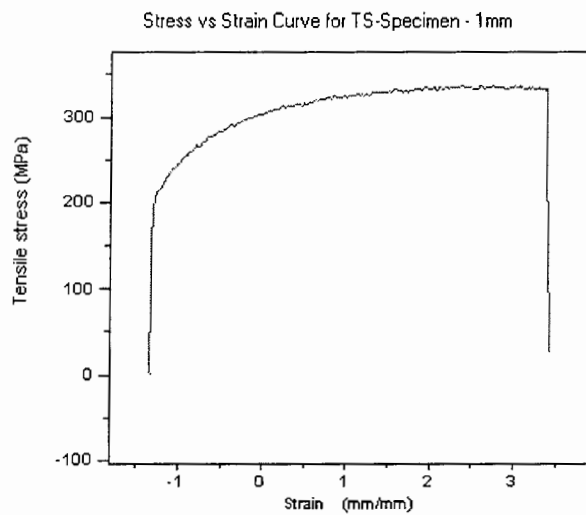
• خواص ماده

تمامی نمونه‌های استفاده شده در این تحقیق از جنس فولاد معمولی St37 بودند. آزمایش کشش استاندارد توسط مولف و برطبق استاندارد Standard Test Methods of ASTM Tension of Metallic Materials (E8) به منظور تعیین نمودار تنش- کرنش بدست آمد. برای هر ورق با ضخامت‌های ۱ و ۱,۵ میلی‌متر دو آزمایش کشش انجام شد که برخی از منحنی‌های بار-جابجایی و تنش-کرنش حاصله در شکل (۴) آورده شده است. حداکثر نیروی متوسط قابل تحمل

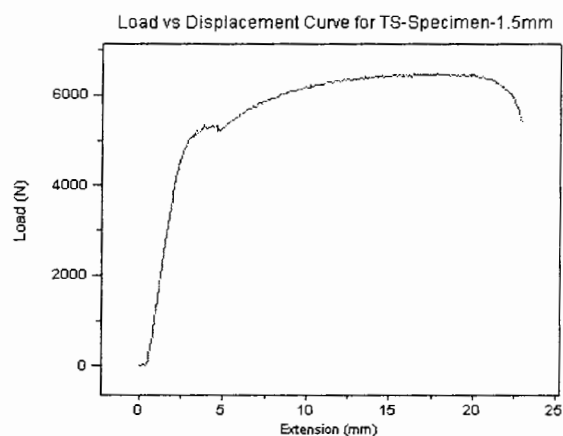
توسط ورق ۱ میلیمتری برابر ۴۲۴۹ N و ورق ۱٫۵ میلیمتری برابر ۶۵۱۶ N بود. عرض نمونه‌های کشش استاندارد برابر ۱۲٫۵ میلیمتر بود.



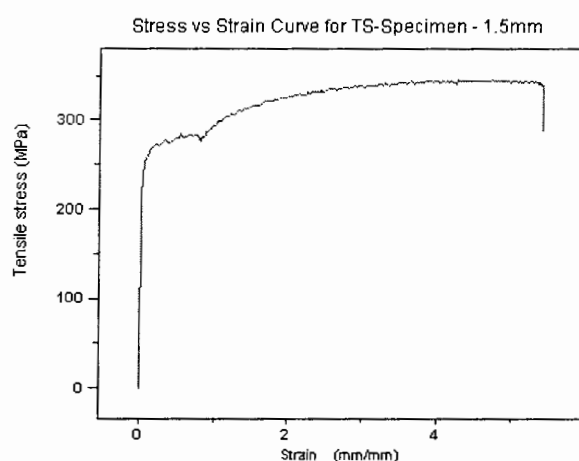
الف- منحنی بار - جابجایی مربوط به ورق به ضخامت ۱ mm



ب- منحنی تنش - کرنش مربوط به ورق به ضخامت ۱ mm



ج- منحنی بار- جابجایی مربوط به ورق به ضخامت ۱٫۵ mm



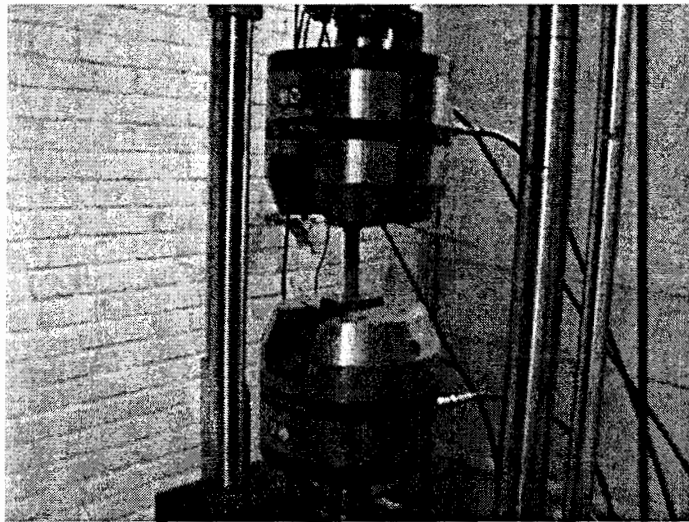
د- منحنی تنش - کرنش مربوط به ورق به ضخامت ۱٫۵ mm

شکل ۴- منحنی‌های بار-جابجایی و تنش-کرنش ماده ورق‌های نقطه‌جوش شده

۲-۲ آزمایش‌های خستگی

• پیش‌بینی عمر خستگی

آزمایش‌های خستگی با استفاده از یک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802 تحت بارگذاری با دامنه ثابت انجام شد که در شکل (۵) نشان داده شده است. آزمایش‌ها در حالت کنترل بار و با فرکانس ۱۰ Hz انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها برای هر سه نمونه در جدول (۲) ارائه شده است.

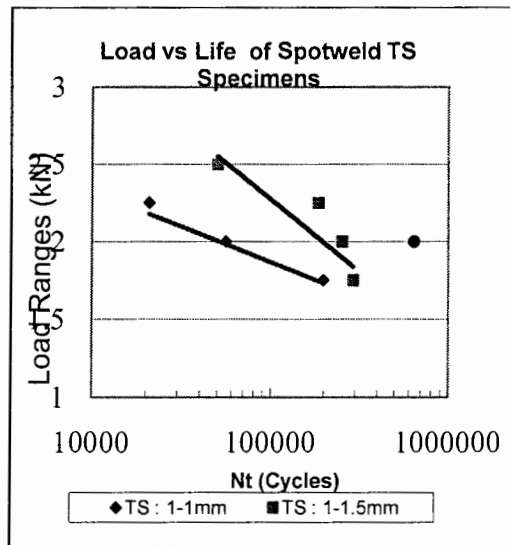


شکل (۵) - نحوه قرار گرفتن نمونه ها در فک های دستگاه تست خستگی INSTRON 8802

جدول (۲): نتایج عمر خستگی برای نمونه های TS با نسبت بار $R = 0.1$

توضیحات	نسبت بار R	تعداد سیکل N_f بارگذاری تا شکست نمونه	حداکثر نیروی اعمالی (N)	نوع نمونه TS
پارگی ورقه حول نقطه جوش در نمونه	0.1	197654	1750	1 mm - 1 mm
پارگی ورقه حول نقطه جوش در نمونه، در ورقه دیگر نیز پارگی نسبی رخ داده است.	0.1	55608	2000	
پارگی ورقه حول نقطه جوش در نمونه، در ورقه دیگر نیز پارگی نسبی رخ داده است.	0.1	20809	2250	
پارگی ورقه حول نقطه جوش در ورقه 1 mm	0.1	291641	1750	1/5 mm - 1 mm
شکست عرضی در ورقه 1 mm. در ورقه دیگر ترکی مشاهده نمی شود.	0.1	251683	2000	
پارگی ورقه حول نقطه جوش در ورقه 1 mm	0.1	184992	2250	
پارگی ورقه حول نقطه جوش در ورقه 1 mm ترکی بطول 4 mm در ورقه دیگر دیده میشود.	0.1	49915	2500	
شکست عرضی در نمونه، در ورقه دیگر ترکی بطول 20 mm دیده می شود.	0.1	636618	2000	1/5 mm 1/5 mm

در شکل (۶) نمودار بار بر حسب تعداد سیکل قابل تحمل، برای هر سه نوع نمونه نشان داده شده است.



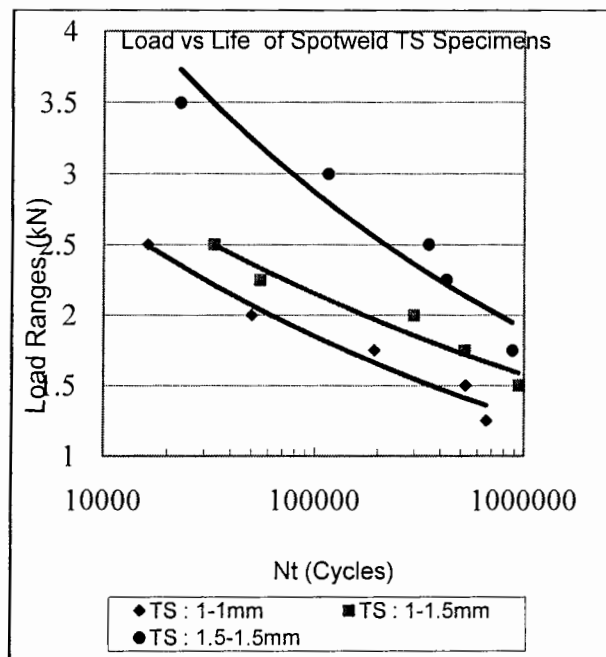
شکل (۶): نمودار بار بر حسب عمر خستگی با نسبت بار $R = 0.1$

همچنین نتایج آزمایش‌های خستگی دیگری که تحت بارگذاری با دامنه ثابت و نسبت بار $R = 0.05$ و در حالت کنترل بار و با فرکانس 20 Hz انجام شدند و تا شکست کامل ادامه یافتند، در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳) - نتایج آزمایشات خستگی بر روی نمونه‌های TS با نسبت بار $R = 0.05$

F_{max} (kN)	N_f : تعداد سیکل تا شکست کامل		
	TS : 1-1 mm	TS : 1-1/5 mm	TS : 1/5-1/5 mm
1/25	659,222	---	---
1/50	524,428	943,576	---
1/75	191,335	520,095	874,606
2/00	49,955	296,627	---
2/25	---	55,062	425,946
2/50	16,109	33,253	347,830
3/00	---	---	114,747
3/50	---	---	22,801

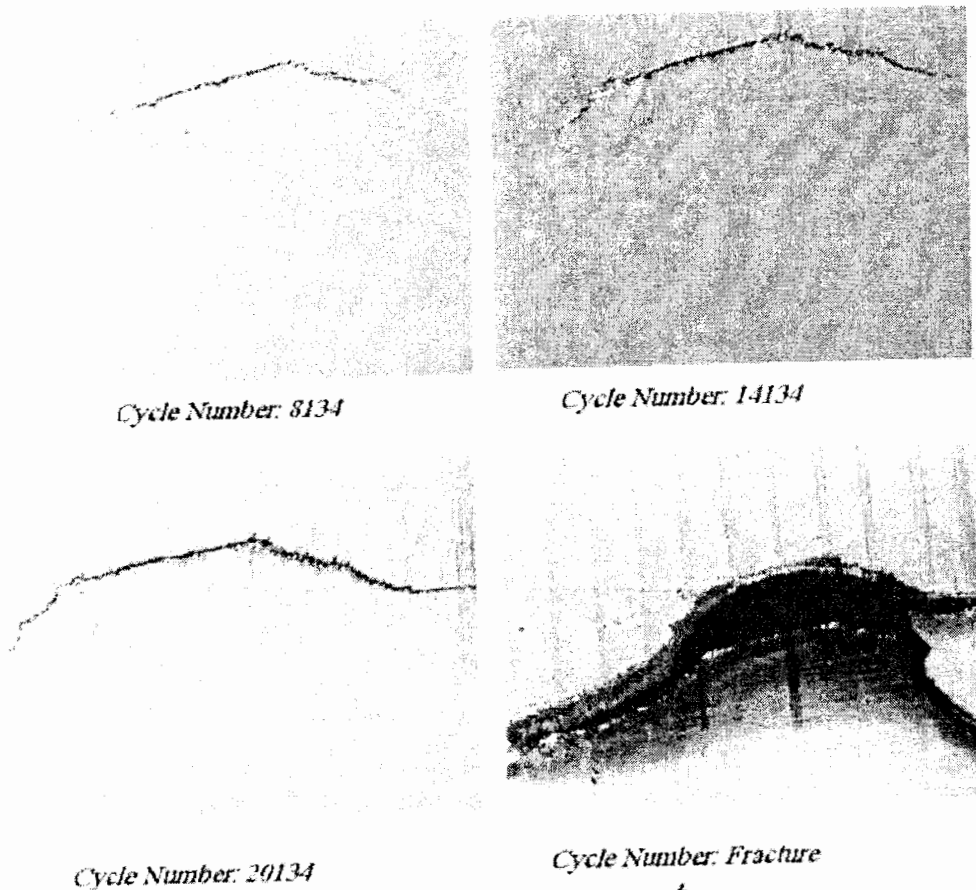
در شکل ۷، نمودار بار بر حسب عمر خستگی برای هر سه نوع نمونه نشان داده شده است. این عمر مربوط به هر سه مرحله جوانه زنی ترک، انتشار و شکست نمونه می باشد.



شکل (۷) - نتایج بار بر حسب عمر خستگی نمونه های نقطه جوش شده با نسبت بار $R = 0.05$

۳-۳ بررسی رفتار رشد ترک خستگی

بخش عمده ای از طول عمر خستگی نمونه مربوط به جوانه زنی و رشد ترک در محل اتصال نقطه جوش و انتشار آن تا سطح نمونه ها می باشد که متاسفانه قابل رویت نمی باشد. از آنجایی می توان رفتار رشد ترک را بطور دقیق مورد بررسی قرار داد که ترک به سطح قطعه رسیده باشد و به وضوح دیده شود که در این تحقیق نیز به کمک یک میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، طول ترک در سیکل های بارگذاری مختلف اندازه گیری شده است که تعدادی از تصاویر مربوطه در شکل (۸) دیده می شود.



شکل (۸) - تصاویر گرفته شده از نحوه رشد ترک در سطح نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری

معمولاً قبل از رسیدن ترک به سطح، در اطراف نقطه جوش، فرورفتگی هایی شکل می گیرد که ناشی از بار اعمالی و تغییر شکل نمونه می باشد.

در جدول (۴) درصد طول عمر ترک و همچنین تعداد سیکل بارگذاری مربوط به مراحل جوانه زنی و رشد ترک تا قبل از رسیدن به سطح ورق به ازای بارگذاری های مختلف و ضخامت های متفاوت نمونه های TS بدست آمده است. از بررسی داده های جدول (۴)، نتایج زیر حاصل می گردد:

۱- همانطور که مشاهده می شود بین حدود ۵۰ تا ۹۰ درصد طول عمر ترک مربوط به جوانه زنی و رشد آن در درون قطعه میباشد.

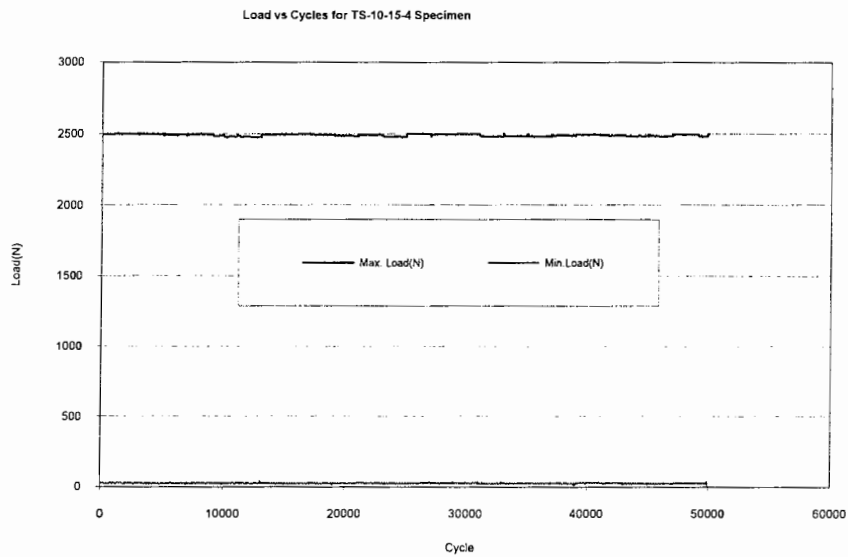
جدول (۴) طول عمر ترک خستگی در مراحل جوانه زنی و رشد ترک تا هنگام رسیدن به سطح نمونه و تا شکست کامل

نوع نمونه TS	حداکثر بار اعمالی (N)	N_p ، سیکلی که ترک در سطح نمونه قابل رویت میشود.	N_f ، عمر نهایی	$\frac{N_p}{N_f} \times 100$
1mm-1mm	۱۷۵۰	۹۷۸۶۵	۱۹۷۶۵۴	۴۹/۵
	۲۰۰۰	۳۵۰۰۰	۵۵۶۰۸	۶۲/۹
	۲۲۵۰	۱۸۹۳۸	۲۰۸۰۹	۹۱
1mm-۱/۵mm	۱۷۵۰	۱۴۰۰۱۵	۲۷۱۶۴۱	۵۱/۵
	۲۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۲۷۱۶۸۳	۷۳/۶
	۲۲۵۰	۱۰۲۰۰۰	۱۸۴۹۹۲	۵۵/۱
	۲۵۰۰	۲۹۰۰۰	۴۹۹۱۵	۵۸/۱
۱/۵mm-۱/۵mm	۲۰۰۰	۴۶۷۱۶۱	۶۳۶۶۱۸	۷۳/۴

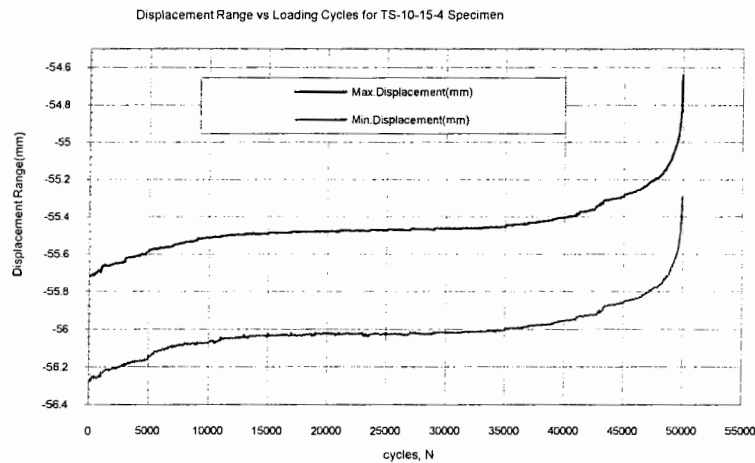
۲- همچنین هر قدر ضخامت نمونه بیشتر می شود، درصدی از طول عمر قطعه که ترک در داخل نمونه رشد می کند، بیشتر است؛ زیرا ترک برای رسیدن به سطح ورق باید مسیر طولانی تری را طی کند.

همانطور که قبلا بیان شد، متاسفانه امکان اندازه گیری مراحل جوانه زنی و رشد ترک در درون قطعه وجود نداشت، ولی می توان تا حد قابل قبولی شروع انتشار ترک در درون نمونه را با اندازه گیری تغییرات سختی (Stiffness) آن در حین بارگذاری، اندازه گیری کرد. بدین ترتیب که نمودار بار بر حسب تعداد سیکل بارگذاری نمونه را از ابتدای بارگذاری تا انتهای آن ترسیم کرده و شیب آنرا در کل نمودار محاسبه نماییم. در هر نقطه از نمودار که تغییر شیب زیادی مشاهده شود، به احتمال زیاد، آن نقطه شروع انتشار ترک در درون ماده است و می توان تعداد سیکل متناظر با آن را بدست آورد. از طرفی تعداد سیکل مربوط به اولین مشاهده ترک در سطح نمونه، قبلا اندازه گیری شده است؛ لذا می توان با تفریق کردن آنها از یکدیگر، تعداد سیکل بارگذاری از شروع انتشار ترک در درون ماده تا رسیدن آن به سطح نمونه را محاسبه کرد. این موضوع برای نمونه های ۴-۱۵-۱۰- TS و ۴-۱۰-۱۰- TS در شکل های ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، شروع انتشار ترک در درون نمونه ۴-۱۵-۱۰- TS را میتوان در جایی دانست که شیب نمودار جابجایی - سیکل بارگذاری تقریباً صفر می شود. یعنی به ازای حدود ۱۲۰۰۰ سیکل بارگذاری. در حالی که برای این نمونه، به ازای ۲۹۰۰۰ سیکل بارگذاری، برای اولین بار، ترک در سطح نمونه مشاهده شده است.



شکل (۹) - نمودار بار بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه ۱۰-۱۵-۴ - TS

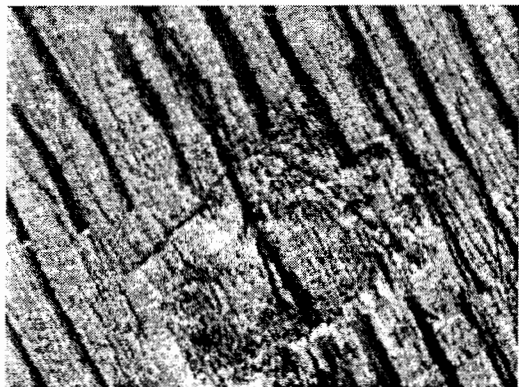


شکل (۱۰) - نمودار بار بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه ۱۰-۱۵-۴ - TS

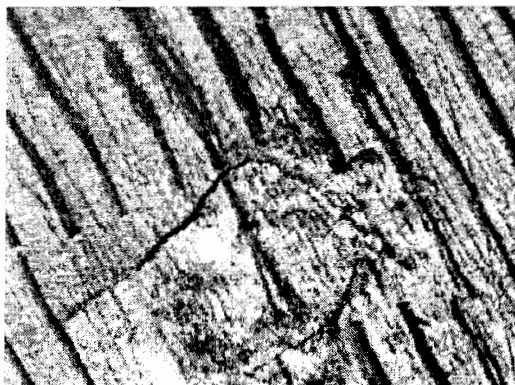
بعضی از تصاویر مربوط به رشد ترک نمونه TS - ۱۰-۱۵-۴ پس از رسیدن آن به سطح نمونه تا زمان شکست کامل آن که با میکروسکوپ نوری Nikon با بزرگنمایی 100X برداشته شده است، در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



الف- تصویر نقطه جوش قبل از شروع بارگذاری ($N=0$)



ب- تصویر نقطه جوش پس از ۴۵۰۰۰ سیکل بارگذاری

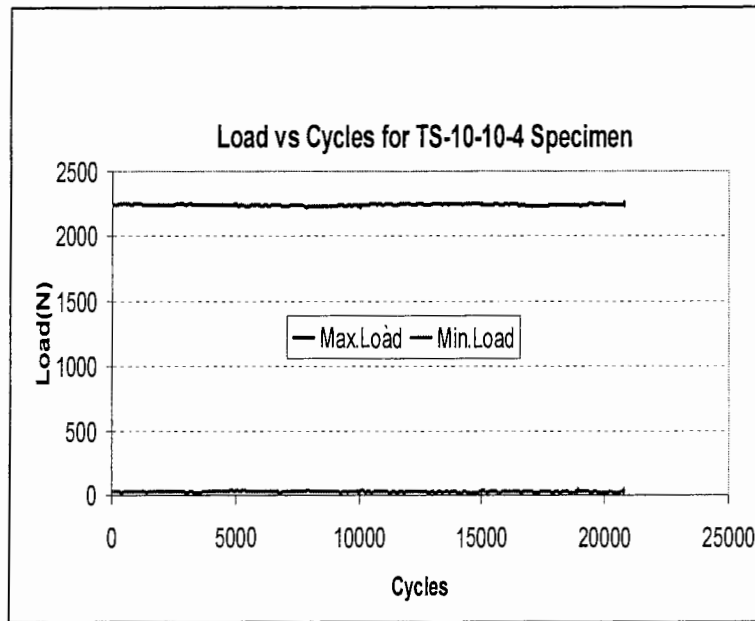


ج- تصویر نقطه جوش پس از ۴۹۰۰۰ سیکل بارگذاری



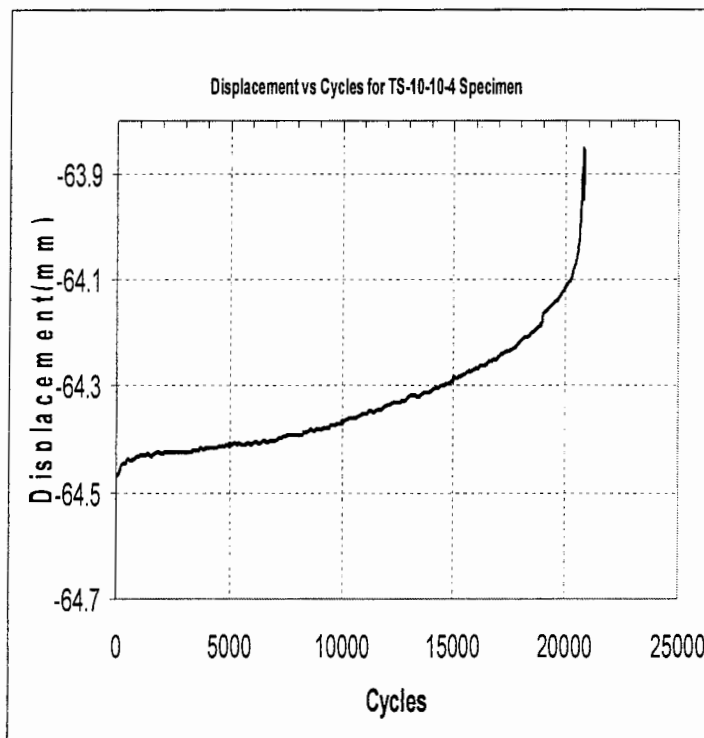
د- تصویر نقطه جوش پس از ۴۹۸۰۰ سیکل بارگذاری

شکل (۱۱) - تصاویر مرحله ای مربوط به رشد ترک نقطه جوش پس از رسیدن به سطح نمونه تا شکست کامل



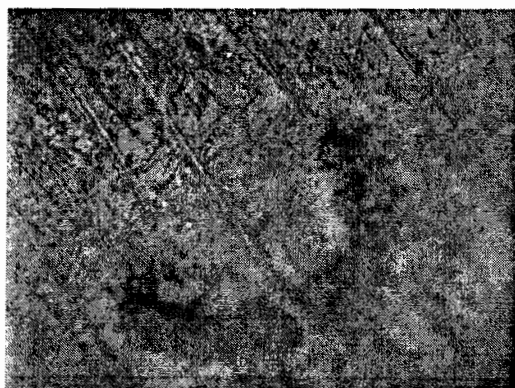
شکل (۱۲) - نمودار بار بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه ۴-۱۰-۱۰-۱۰ TS

همچنین برای نمونه ۴-۱۰-۱۰-۱۰ TS، مطابق شکل (۱۳)، شروع انتشار ترک در درون نمونه را می توان به ازای حدود ۶۰۰۰ سیکل بارگذاری دانست.



شکل (۱۳) - نمودار بار بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه ۴-۱۰-۱۰-۱۰ TS

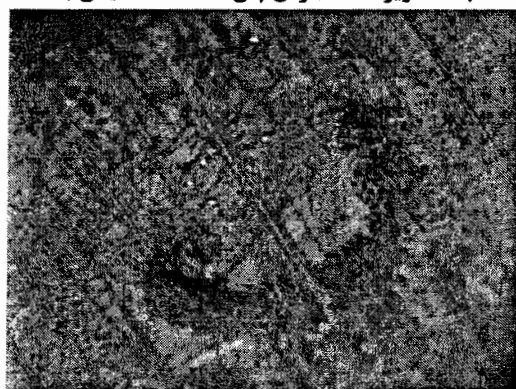
همچنین بعضی از تصاویر مربوط به رشد ترک نمونه ۴-۱۰-۱۰- TS پس از رسیدن آن به سطح نمونه تا زمان شکست کامل آن در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این نمونه از تصاویر مشاهده می گردد که پس از رسیدن ترک به سطح نمونه، خیلی سریع واماندگی کامل اتفاق افتاده است.



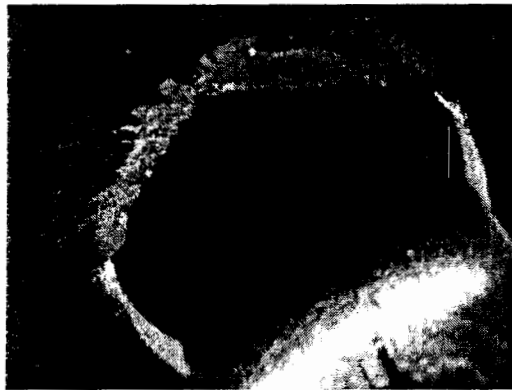
الف- تصویر نقطه جوش پس از ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری



ب- تصویر نقطه جوش پس از ۴۵۰۰۰ سیکل بارگذاری

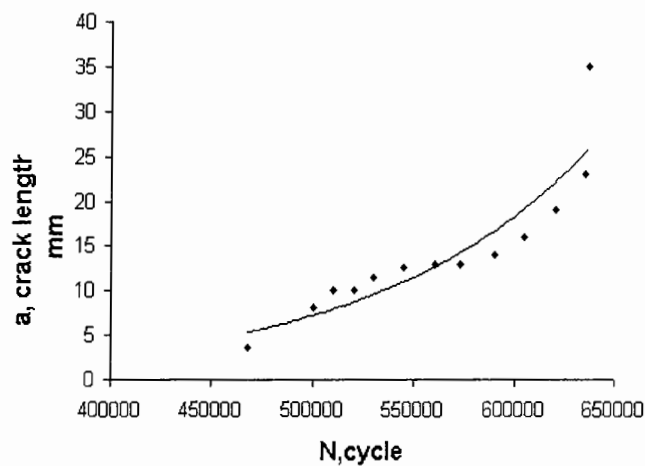


ج- تصویر نقطه جوش پس از ۴۹۰۰۰ سیکل بارگذاری

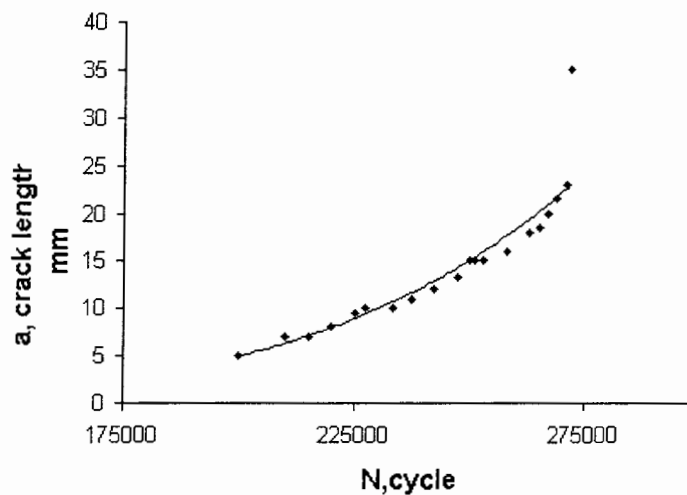


د- تصویر نقطه جوش پس از ۴۹۸۰۰ سیکل بارگذاری
 شکل (۱۴) - تصاویر مرحله ای مربوط به رشد ترک نقطه جوش پس از رسیدن به سطح نمونه تا شکست کامل

در شکل های (۱۵) و (۱۶) نمودارهای طول ترک بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای دو نمونه *TS10-15-2* و *TS15-15-1* آورده شده است.



شکل (۱۵) - نمودار طول ترک بر حسب سیکل، نمونه *TS10-15-2*



شکل (۱۶) - نمودار طول ترک بر حسب سیکل، نمونه *TS15-15-1*

برای دو نمونه مذکور، روابط زیر بین طول ترک a و تعداد سیکل بارگذاری N بدست آمده است:

- رابطه طول ترک بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه $TS10-15-2$:

$$a = 0.0773e^{2 \times 10^{-5} N}$$

- رابطه طول ترک بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه $TS15-15-1$:

$$a = 0.0683e^{9 \times 10^{-6} N}$$

با مشتق گرفتن از روابط فوق نسبت به N به روابط زیر برای نرخ رشد ترک بر حسب سیکل بارگذاری داریم:

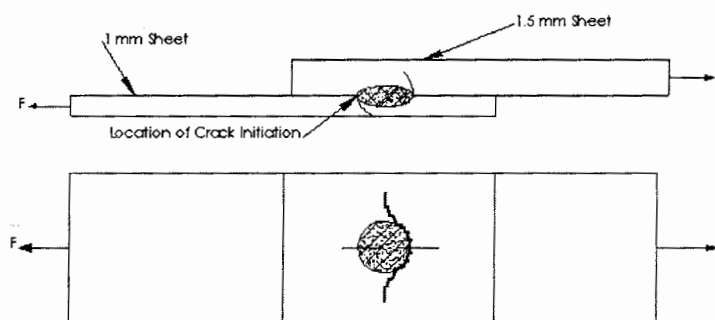
$$\frac{da}{dN} = 0.154 \times 10^{-5} e^{2 \times 10^{-5} N}$$

$$\frac{da}{dN} = 0.596 \times 10^{-6} e^{9 \times 10^{-6} N}$$

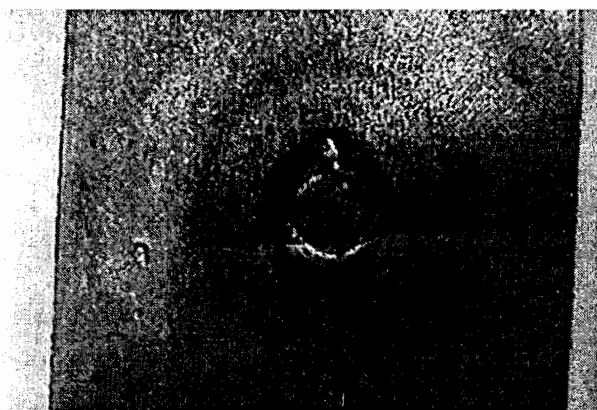
۴-۲ بحث و بررسی نتایج

از بررسی و مشاهده سطوح و مقاطع شکست، نتایج زیر حاصل می شود:

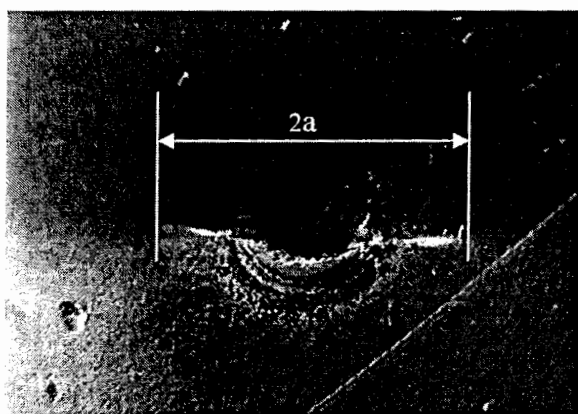
- ۱- در تمام نمونه‌ها مطابق شکل‌های ۱۷ و ۱۸، جوانه‌زنی و رشد ترک در اطراف نقطه‌جوش و از سمتی که بارگذاری اعمال می‌شد، ایجاد شده است.



شکل (۱۷) - محل جوانه‌زنی و رشد ترک در اطراف نقطه‌جوش



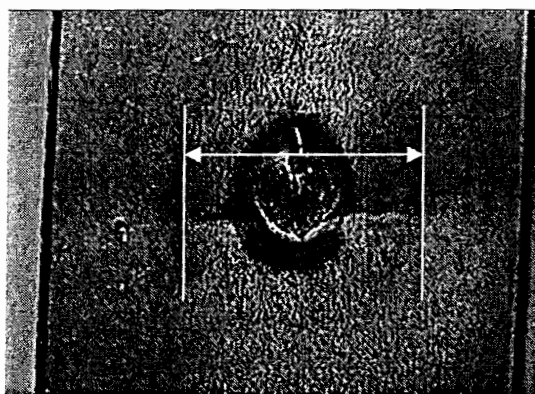
(الف)



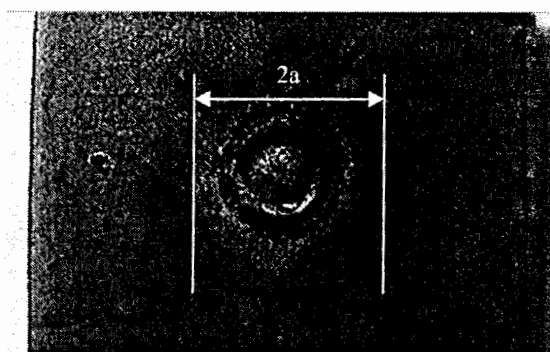
(ب)

شکل (۱۸) - محل جوانه‌زنی و رشد ترک در یک نمونه واقعی

۲- همواره ابتدا ترک در سطح ورق نازکتر مشاهده می‌شد و طول ترک نیز در ورق نازکتر نسبت به ورق ضخیم‌تر بلندتر بود. این موضوع در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است.



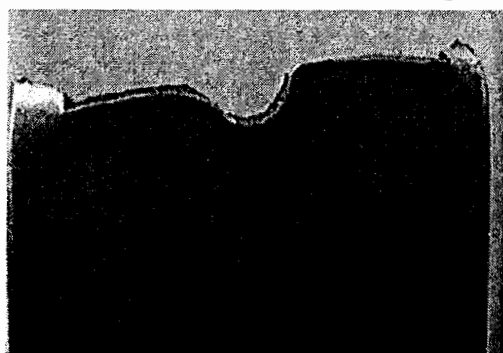
شکل (۱۹) - طول ترک در ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر



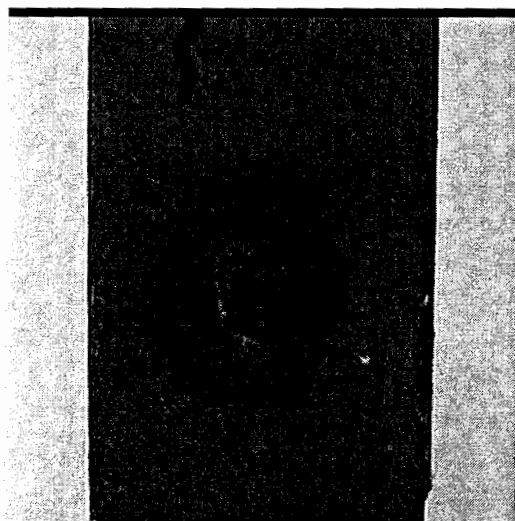
شکل (۲۰) - طول ترک در ورق با ضخامت ۱/۵ میلیمتر

۳- طول ترک در ورق‌های با ضخامت یکسان، در هر دو نمونه تقریباً یکسان بود.

۴- در بارهای کم، ترک از اطراف نقطه جوش جوانه می‌زد و سپس در حد قابل توجهی در جهت عرض ورق انتشار می‌یافت و در نهایت شکست کامل اتفاق می‌افتاد (شکل ۱۹). ولی هر قدر مقدار بار افزایش می‌یافت، مقدار انتشار ترک در ورق کمتر می‌شد، بطوری که در بارهای نسبتاً زیاد، ترک فقط در اطراف نقطه جوش به مقدار کمی رشد می‌کرد و سپس ناگهان دگمه جوش از جای خود خارج شده و شکست اتفاق می‌افتاد (شکل ۲۱).



(الف)

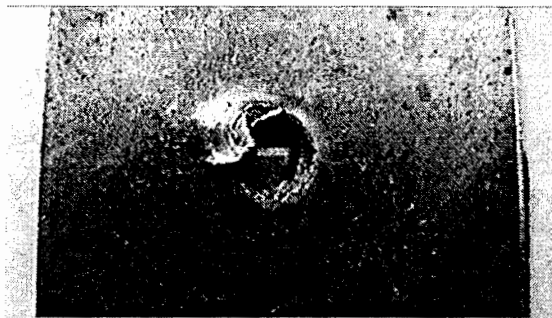


(ب)

شکل (۲۱) - انتشار ترک در ورق‌هایی که تحت بارهای نسبتاً کم قرار گرفته و در زیادی رشد کرده است



(الف)

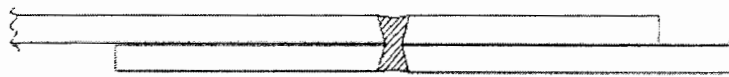


(ب)

شکل (۲۲) - انتشار ترک در ورقهایی که تحت بارهای نسبتاً زیاد قرار گرفته و پس از کمی رشد دچار گسیختگی شده است

۵- ترک همواره در اثر تمرکز تنش موجود در اطراف نقطه جوش، از نقطه ای در اطراف آن که کمترین فاصله به لبه محل بارگذاری را دارد شروع شده و سپس در اطراف نقطه جوش در هر طرف حدود ۴۵ تا ۶۰ درجه رشد کرده و آنگاه از محیط نقطه جوش جدا شده و به طرف لبه های جانبی نمونه منتشر میگردد (شکل های ۱۹ تا ۲۱).

۶- وقتی دو ورق به یکدیگر نقطه جوش می شوند، اتصال بوجود آمده به صورت دو مخروط ناقص متقابل بوده که بطور شماتیکی در شکل (۲۳) و بطور واقعی در شکل (۲۴) نشان داده شده است. این موضوع باعث ایجاد تمرکز تنش در محل اتصال دو صفحه به یکدیگر می شود و موجب می گردد که جوانه زنی و رشد ترک از آنجا شروع گردد.



شکل (۲۳) - شماتیک دو مخروط ناقص بوجود آمده در محل اتصال نقطه جوش



شکل (۲۴) - هندسه نقطه جوش در بین دو ورق که تقریباً به شکل یک مخروط ناقص است

۷- ترک ابتدا در محل اتصال دو ورق به یکدیگر جوانه زده و رشد کرده و سپس به سطح هر یک از نمونه ها می رسد و آنگاه با سرعت نسبتاً زیادی منتشر می گردد.

۵-۳ نتایج

از انجام این تحقیق نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- هر قدر سطح بارگذاری بیشتر باشد، طول عمر خستگی نمونه کاهش می یابد؛ زیرا در بارهای زیاد در اثر تغییر شکل پلاستیک، دکمه جوش پس از کمی رشد ترک، از جای خود کنده میشود. ولی در بارهای کم، ترک به اندازه کافی فرصت رشد پیدا می کند.
- ۲- جوانه زنی و رشد ترک همواره در نمونه با ضخامت کمتر زودتر اتفاق می افتد و طول ترک در آن بزرگتر است.
- ۳- ورق های با ضخامت بیشتر، طول عمر خستگی بیشتری دارند (شکل های ۶ و ۷).
- ۴- اگر به ورق ها بار بیش از حد اعمال شود، بدون آنکه قادر باشند بارگذاری خستگی را تحمل کنند، ناگهان گسیخته می شوند و دکمه جوش از جای خود در می آید.

فصل چهارم

تحقیق تجربی انجام شده بر روی نمونه های نقطه جوش شده MCP¹ به منظور بررسی رفتار رشد ترک و تعیین طول عمر خستگی

۱-۴ مقدمه

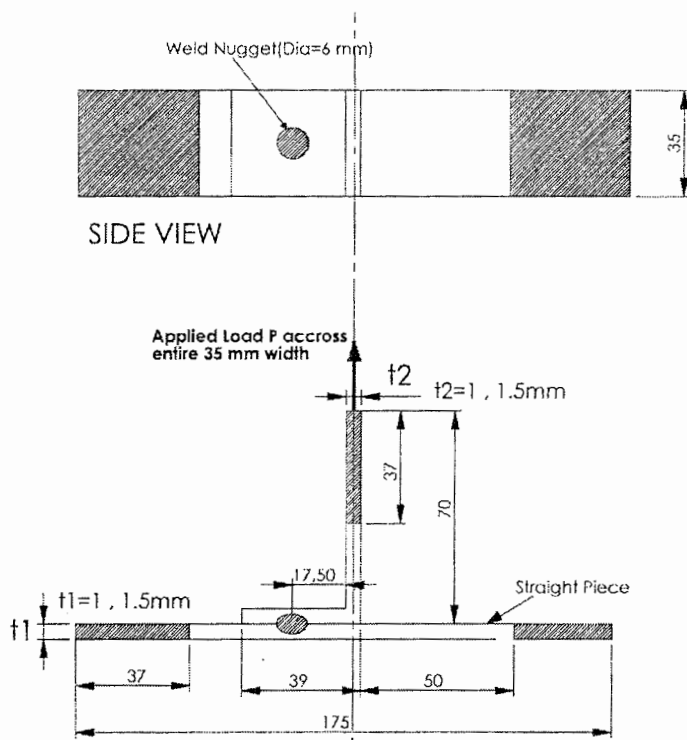
در این تحقیق، رفتار رشد ترک و طول عمر خستگی نمونه های نقطه جوش شده نوع MCP (Modified Coach Peel) بطور تجربی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. در ابتدا نمونه هایی MCP از جنس فولاد نرم (Milled Steel) و از طریق جوشکاری نقطه ای با ضخامت های ۱ و ۱/۵ میلیمتر آماده شد و سپس توسط یک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802 با ظرفیت نیروسنج ۲۵ kN، تحت تاثیر بارگذاری متناوب با دامنه ثابت ولی سطوح بار مختلف قرار گرفتند. در حین بارگذاری طول ترک و همچنین تعداد سیکل بارگذاری برای هر نمونه با دقت اندازه گیری می شد. در این تحقیق نحوه شروع و انتشار ترک در نمونه ها بصورت تجربی مورد توجه قرار گرفته است. با ترسیم نمودار جابجایی عمودی نمونه بر حسب تعداد سیکل بارگذاری می توان بطور تقریبی شروع انتشار (Propagation) ترک را اندازه گرفت. نتایج تحقیق نشان می دهد که شروع و انتشار ترک غالباً از نمونه های با ضخامت کمتر آغاز شده و شکست نهایی در آنها اتفاق می افتد. همچنین طول ترک در نمونه های نازکتر بیشتر از طول ترک در نمونه های ضخیمتر است. علاوه بر این نتایج تجربی نشان می دهد که در بارهای کم، ترک به اندازه کافی رشد می کند ولی در بارهای زیاد، ترک ابتدا به مقدار کمی حول نقطه جوش (Nugget) رشد کرده و سپس ناگهان نقطه جوش از جای خود درآمده و زوال کامل اتفاق می افتد.

1. Modified Coach Peel

۴-۲ نتایج تجربی

• نمونه‌های آزمایش

در این تحقیق از چهار نوع نمونه MCP با ضخامت‌های متفاوت استفاده شد. ابعاد نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های MCP با ورق‌های با ضخامت ۱ mm به ۱ mm، ۱ mm به ۱/۵ mm، ۱/۵ mm به ۱/۵ mm و ۱/۵ mm به ۱ mm، به یکدیگر نقطه جوش شده‌اند. تعداد هر نوع نمونه آزمایش شده حداقل ۳ عدد بود که تحت شرایط مختلف بارگذاری با دامنه ثابت مورد آزمایش قرار گرفتند. عمر خستگی نمونه‌ها از ۵۰،۰۰۰ تا ۲۰۰،۰۰۰ سیکل تغییر می‌کرد.



شکل ۱- هندسه و ابعاد نمونه‌های MCP نقطه جوش شده

• شرایط جوشکاری نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایش با استفاده از یک دستگاه جوش نقطه ای پدالی آماده شده است. شرایط جوشکاری به شرح زیر می باشد:

جریان جوشکاری: NA .

زمان نگهداری: ۳ ثانیه

قطر الکترود: ۶-۵/۶ mm

جنس قطعات از فولاد معمولی می باشد.

• روش نامگذاری نمونه های MCP

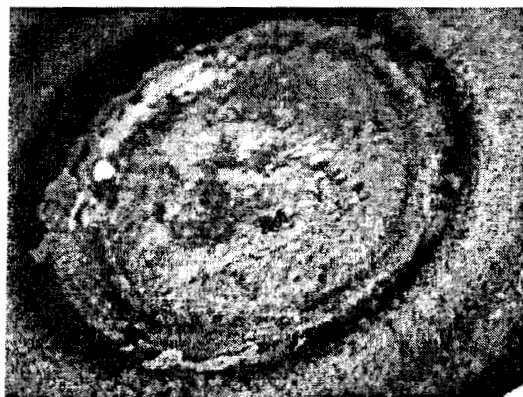
با توجه به استفاده از ورقه های با دو ضخامت متفاوت، نمونه های MCP به چهار گروه مختلف تقسیم می شود. نمونه ها بصورت *-**-**MCP نشان داده می شوند. MCP به نوع نمونه اشاره دارد. عدد اول از سمت چپ اندازه ضخامت ورقه L شکل می باشد (که در عدد ۱۰ ضرب شده است). عدد دوم از سمت چپ اندازه ضخامت ورقه صاف می باشد (که در ۱۰ ضرب شده است). عدد سوم به شماره قطعه در هر سری اشاره دارد. در این آزمایش هر سری از نمونه ها شامل حداقل سه نمونه بود.

• حداکثر نیروی کششی استاتیکی قابل تحمل توسط نقطه جوش

قطر نقطه جوش (Nugget) برابر ۶ میلیمتر بود که در شکل ۲ نشان داده شده است. هر چهار نوع نمونه پس از اینکه نقطه جوش شدند، مطابق شکل ۳ توسط دستگاه INSTRON 8802 تحت آزمایش کشش قرار گرفتند و استحکام کششی نقطه جوشها (حداکثر نیروی کششی قابل تحمل توسط نقطه جوش) اندازه گیری شدند. استحکام کششی متوسط نمونه ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- حداکثر نیروی کششی قابل تحمل توسط نمونه ها

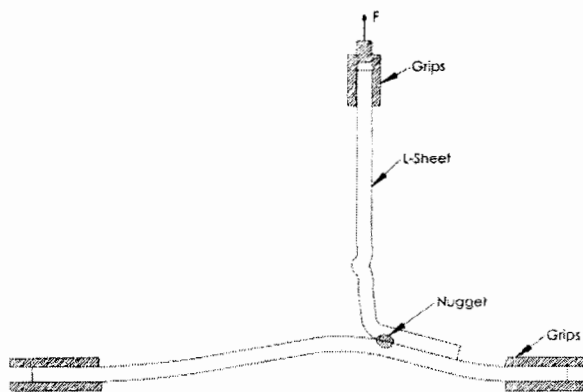
استحکام کششی (N)	نوع نمونه MCP
۲۳۳۱٫۸	۱ mm-۱ mm
۲۴۲۰٫۹	۱ mm - ۱٫۵ mm (ورق صاف) (ورق L شکل)
۲۴۵۱٫۳	۱٫۵ mm - ۱٫۵ mm
۲۱۱۵	۱٫۵ mm - ۱ mm (ورق صاف) (ورق L شکل)



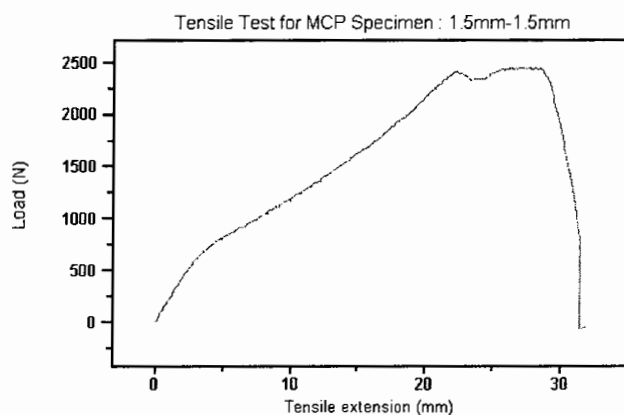
شکل ۲- مقطع نقطه جوش در سطح ورق (قطر الکتروود برابر ۶/۵ mm است)

یک نمودار نیرو-جابجایی حاصل از اندازه‌گیری استحکام کششی نقطه‌جوش در شکل ۳ نشان داده

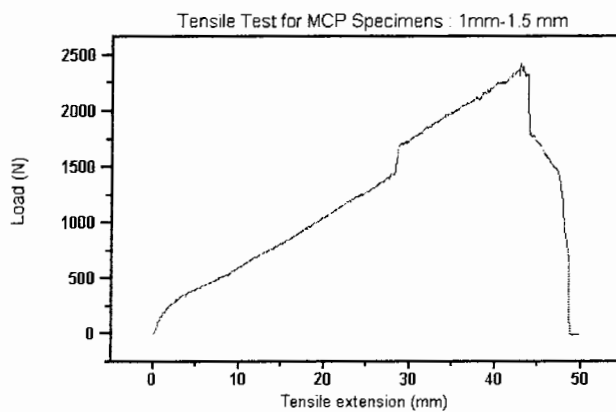
شده است.



شکل ۳- آزمایش کشش برای تعیین استحکام کششی نقطه‌جوش‌ها



الف- نمونه ۱/۵-۱/۵mm MCP

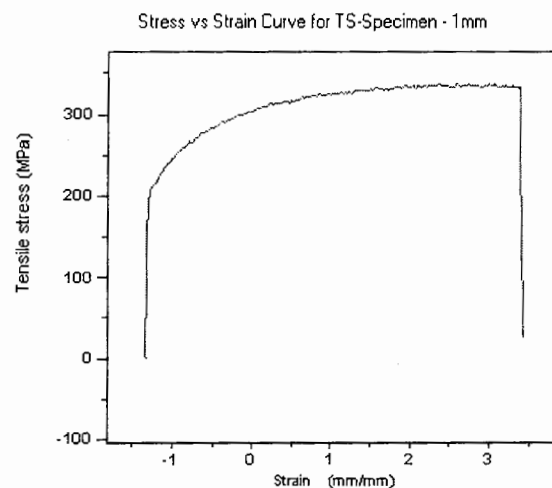


ب- نمونه برای ۱-۱/۵mm MCP

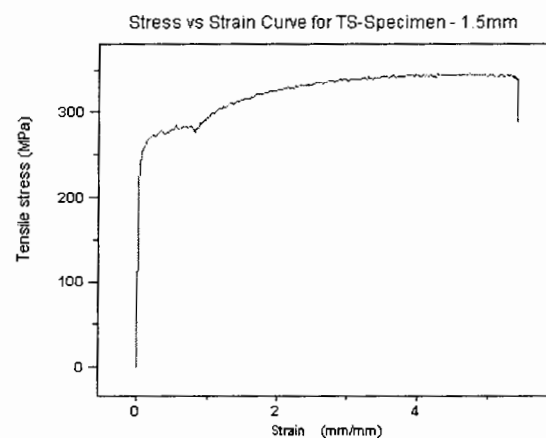
شکل ۴- نمودار نیرو - جابجایی نمونه‌های نقطه‌جوش شده

• خواص ماده

تمامی نمونه‌های استفاده شده در این تحقیق از جنس فولاد فولاد نرم (Milled Steel) بودند. آزمایش کشش استاندارد به کمک یک دستگاه *INSTRON 8802* توسط مولفین و برطبق استاندارد *ASTM Standard Test Methods of Tension of Metallic Materials (E8)* به منظور تعیین نمودار تنش-کرنش، انجام شد. برای هر ورق با ضخامت‌های ۱ و ۱٫۵ میلی‌متر دو آزمایش کشش انجام شد که برخی از منحنی‌های بار-جابجایی و تنش-کرنش حاصله در شکل ۵ آورده شده است. حداکثر نیروی متوسط قابل تحمل توسط ورق ۱ میلی‌متری برابر 4249 N و ورق ۱٫۵ میلی‌متری برابر 6516 N بود. عرض نمونه‌های کشش استاندارد برابر ۱۲٫۵ میلی‌متر بود.



الف- منحنی تنش - کرنش ورق به ضخامت ۱ mm



ب- منحنی تنش - کرنش ورق به ضخامت ۱٫۵ mm

شکل ۵- منحنی‌های بار-جابجایی و تنش-کرنش برای ماده ورق‌های نقطه‌جوش شده در آزمایش کشش ساده

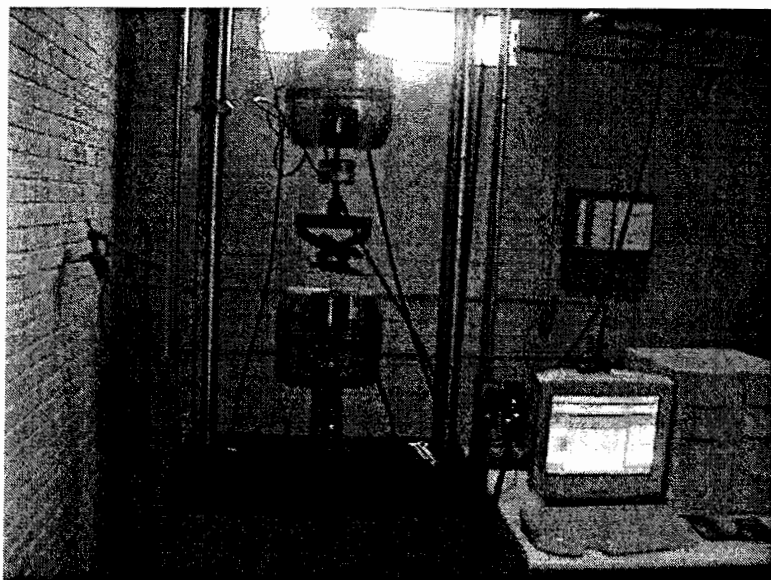
۲-۶ نتایج آزمایش‌های خستگی

در این تحقیق سه هدف از آزمایش‌های خستگی دنبال شده است:

- (۱) پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌ها
- (۲) اندازه‌گیری رشد ترک در جهت عرضی نمونه‌ها (اندازه‌گیری رشد ترک از زمانی که ترک بر روی سطح نمونه قابل رویت می‌گردد تا هنگامیکه نمونه دچار شکست کامل شود ادامه می‌یابد).
- (۳) پیش‌بینی شروع انتشار رشد ترک خستگی

• پیش‌بینی طول عمر خستگی نمونه‌ها

آزمایش‌های خستگی با استفاده از یک دستگاه سروهیدرولیک (INSTRON 8802) تحت بارگذاری با دامنه ثابت انجام شدند. آزمایش‌ها در حالت کنترل بار و با فرکانس ۱۰ Hz انجام شدند. شکل ۶ نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه تست خستگی را نشان می‌دهد. نتایج آزمایشات برای هر چهار نوع نمونه در جداول (۲) و (۳) برای نسبت بارهای به ترتیب $R=0/1$ و $R=0/01$ آورده شده است.



شکل (۶) - نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها در فک‌های دستگاه تست خستگی INSTRON 8802

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های خستگی بر روی نمونه‌های MCP برای نسبت بار $R=0/1$

نوع نمونه MCP	حداکثر نیروی اعمالی (N)	N_f تعداد سیکل بارگذاری شده نمونه‌های در MCP در هر آزمایش	نسبت بار R	طول ترک در تعداد سیکل N_f
1 mm - 1 mm	۱۲۰	۱،۲۰۳،۱۰۰	۰/۱	شکست کامل در ورق صاف (مطابق شکل ۷)
	۱۵۰	۵۴۹،۳۰۰	۰/۱	2a= ۱۵ mm در ورق L شکل (مطابق شکل ۸)
	۲۰۰	۱۹۱،۷۲۱	۰/۱	شکست کامل در ورق L شکل
	۲۵۰	۹۲،۱۰۰	۰/۱	شکست کامل در ورق L شکل [#]
1 mm - 1/۵ mm	۱۵۰	۳۶۶،۲۸۷	۰/۱	2a= ۲۱ mm در ورق L شکل
	۲۰۰	۱۴۱،۷۵۵	۰/۱	شکست کامل در ورق L شکل ^{&}
	۲۵۰	۶۱،۴۰۰	۰/۱	2a= ۱۹/۲ mm در ورق L شکل
	۳۰۰	--	--	---
1/۵ mm - 1/۵ mm	۱۵۰	۱،۰۳۳،۸۱۰	۰/۱	هیچگونه ترکی با چشم غیر مسلح در سطح نمونه مشاهده نمی‌شود
	۲۵۰	۴۱۰،۰۰۰	۰/۱	شکست کامل در ورق L شکل
	۳۰۰	۴۶۰،۰۰۰	۰/۱	2a= ۸ mm
	۴۰۰	۲۱۰،۰۰۰	۰/۱	شکست کامل در ورق صاف
1/۵ mm - 1 mm	۱۵۰	۴۶۸،۵۰۰	۰/۱	شکست کامل در ورق نازک
	۲۰۰	۱۹۷،۲۹۲	۰/۱	شکست کامل در ورق نازک
	۲۵۰	۹۴،۲۷۸	۰/۱	2a= ۱۹/۵ mm در ورق نازک
	۳۰۰	--	--	---

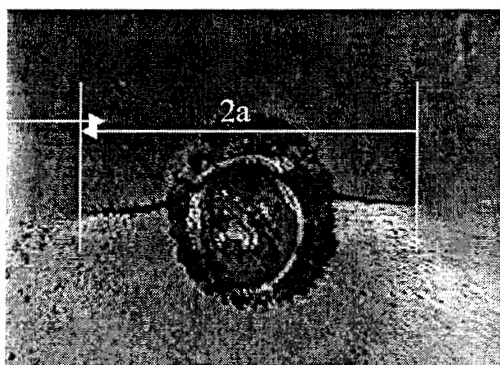
[#] همچنین در تعداد سیکل ۳۱،۰۰۰ ترکی به طول تقریبی $2a = ۸ mm$ در نمونه L شکل مشاهده شد.
[&] همچنین در تعداد سیکل ۹۶،۰۰۰ ترکی به طول تقریبی $2a = ۱۰ mm$ در ورق به ضخامت ۱ mm (نمونه L شکل) مشاهده شد.

جدول (۳): نتایج عمر خستگی برای نمونه های MCP برای نسبت بار $R=0.01$

نوع نمونه MCP	حداکثر نیروی اعمالی (N)	N_f تعداد سیکل بارگذاری تا شکست نمونه	نسبت بار R	توضیحات
1 mm - 1 mm	۱۲۰	۹۲۵۸۳۱	۰/۰۱	شکست کامل در ورق صاف، هیچگونه ترکی در ورق L شکل دیده نمی شود.
	۱۵۰	۳۴۳۸۳۸	۰/۰۱	شکست کامل در ورق صاف، ترکی بطول ۱۴ mm در ورق L دیده می شود.
	۲۰۰	۱۷۳۹۸۱	۰/۰۱	شکست کامل در ورق L شکل، ترکی بطول ۲۲ mm در ورق صاف دیده می شود.
	۲۵۰	۸۶۳۴۸	۰/۰۱	شکست کامل در ورق L شکل، ترکی بطول ۶ mm در ورق صاف دیده می شود.
1 mm - 1/5 mm	۱۵۰	۲۳۶۳۸۱	۰/۰۱	شکست کامل در ورق نازک، در ورق L شکل ترکی دیده نمی شود.
	۲۰۰	۱۱۰۳۲۶	۰/۰۱	شکست کامل در ورق نازک، در ورق L شکل ترکی دیده نمی شود.
	۲۵۰	۱۲۲۷۹	۰/۰۱	ترکی بطول ۱۰ mm در ورق L شکل ایجاد شده است.
1/5 mm - 1/5 mm	۲۵۰	۳۸۰۸۰۸	۰/۰۱	شکست کامل در ورق صاف؛ هیچگونه ترکی در ورق L شکل دیده نمی شود.
	۳۰۰	۷۴۵۹۴	۰/۰۱	شکست کامل در ورق صاف؛ هیچگونه ترکی در ورق L شکل دیده نمی شود.
	۴۰۰	۶۷۴۹۷	۰/۰۱	شکست کامل در ورق صاف؛ هیچگونه ترکی در ورق L شکل دیده نمی شود.
1/5 mm - 1 mm	۲۰۰	۲۱۷۳۶۷	۰/۰۱	شکست کامل در ورق نازک؛ هیچگونه ترکی در ورق L شکل دیده نمی شود.
	۲۵۰	۳۴۰۰۳	۰/۰۱	شکست کامل در ورق نازک؛ هیچگونه ترکی در ورق L شکل دیده نمی شود.

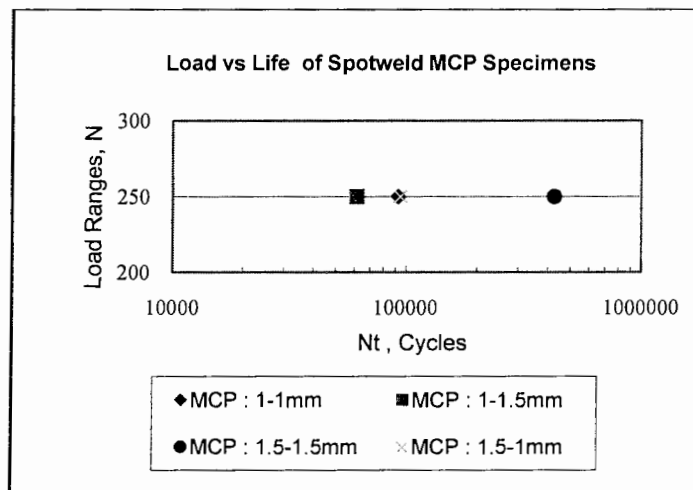


شکل ۷- شکست کامل در ورق

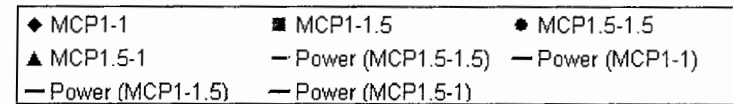
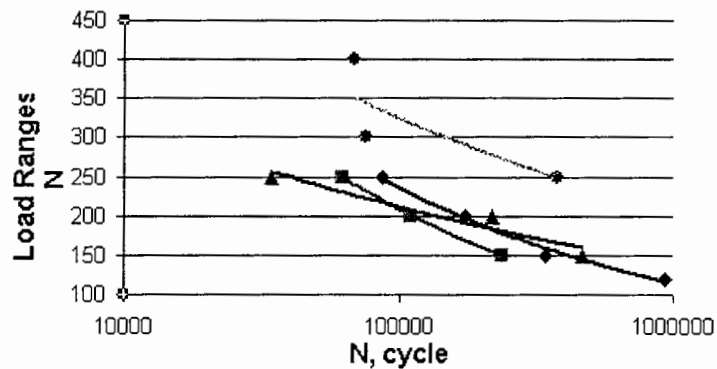


شکل ۸- ترکی به طول 2a

در شکل های ۹ و ۱۰ نمودارهای بار بر حسب عمر خستگی برای هر چهار نوع نمونه به ازای نسبت بارهای به ترتیب $R=0.1$ و $R=0.01$ نشان داده شده است. این عمر مربوط به هر سه مرحله جوانه زنی ترک، انتشار و شکست نمونه می باشد.



شکل ۹- نتایج بار بر حسب عمر خستگی نمونه های نقطه جوش شده در $F_{max}=250\text{ N}$

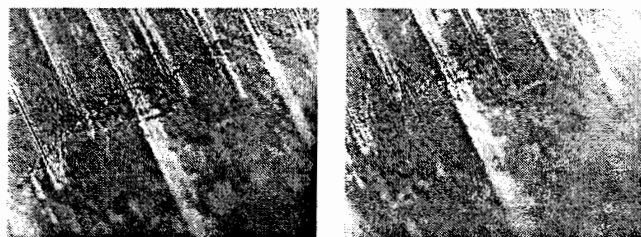


شکل ۱۰ - نتایج بار بر حسب عمر خستگی نمونه‌های نقطه جوش شده MCP

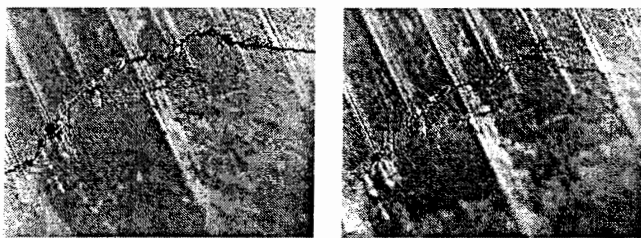
• اندازه گیری رشد ترک خستگی

همزمان با انجام آزمایشها سطح نمونه با استفاده از یک میکروسکوپ *NIKON SMZ-1* با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر و بوسیله یک دوربین دیجیتالی بصورت تصویری کنترل می شد. برای اینکه بتوان رشد ترک را با وضوح بیشتری مشاهده کرد، سطح تمامی قطعات در اطراف جوش نقطه ای با استفاده از سمباده درشت و نرم صیقلی گردید. همچنین برای اینکه در طول بارگذاری، طول ترک برحقی قابل اندازه گیری باشد در روی سطح نمونه ها با استفاده از کولیس خطوطی به فاصله ۱ میلیمتر از یکدیگر ایجاد گردید.

در شکل های (۱۱) و (۱۲) چند نمونه از تصاویر رشد ترک بر روی سطح ورقه *L* شکل ارائه شده است. بایستی خاطرنشان کرد در صورتی که ترک در ورق صاف ایجاد می شد، اندازه گیری طول ترک در حین بارگذاری ممکن نبود، زیرا ورق صاف در قسمت پایین قرار می گیرد و رشد ترک قابل رویت نمی باشد.

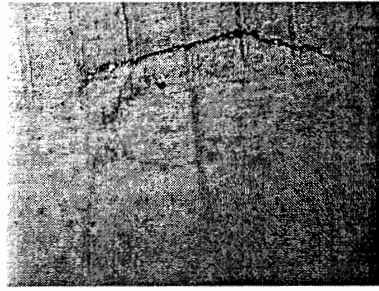


تصویر سطح نقطه جوش قبل از بارگذاری تصویر سطح نقطه جوش پس از ۶۰۰۱۶ اسکال بزرگداری

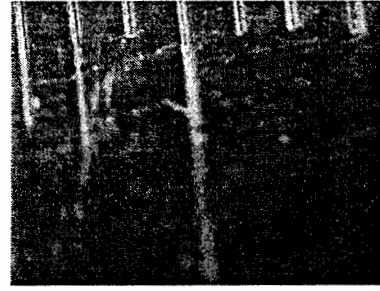


تصویر سطح نقطه جوش پس از ۱۰۰۰۱۶ اسکال بزرگداری تصویر سطح نقطه جوش پس از ۱۲۴۰۱۶ اسکال بزرگداری

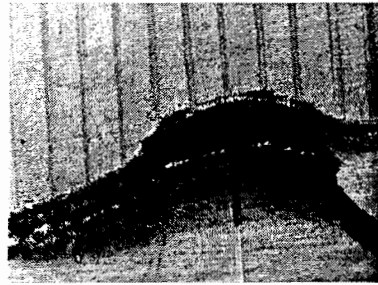
شکل ۱۱ - تصاویر رشد ترک در نمونه MCP-10-10-3 در حین بارگذاری



تصویر سطح نقطه جوش پس از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری



تصویر سطح نقطه جوش قبل از بارگذاری



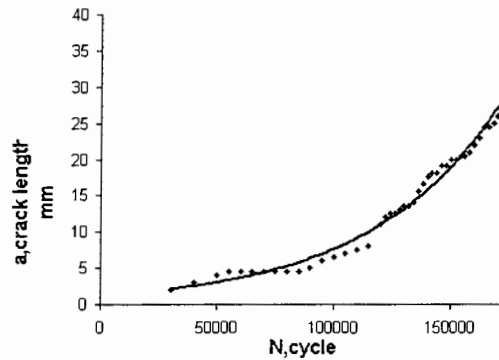
تصویر سطح نقطه جوش پس از ۷۵۰۰۰ سیکل بارگذاری



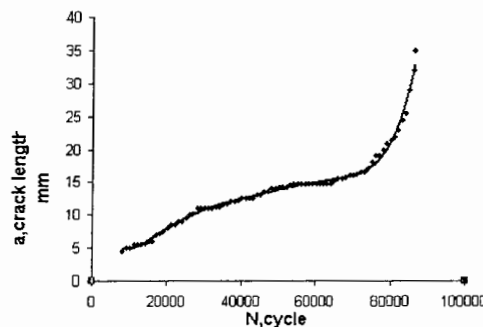
تصویر سطح نقطه جوش پس از ۲۰۰۰۰ سیکل بارگذاری

شکل ۱۲- تصاویر رشد ترک در نمونه MCP-10-10-4 در حین بارگذاری

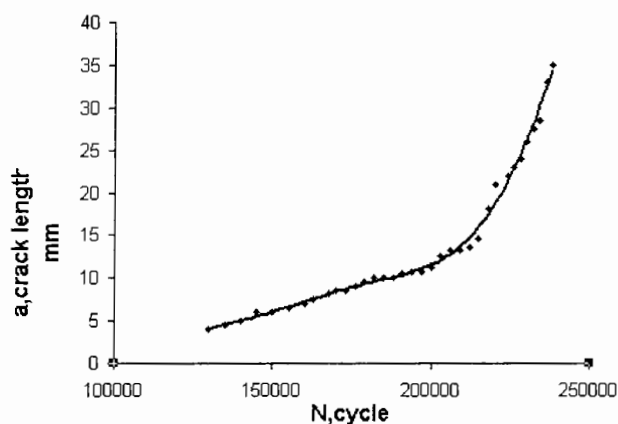
طول ترک در نمونه ها به ازای تعداد سیکل بارگذاری مشخصی اندازه گیری شده و در جدولی ثبت می گردید. نمودارهای طول ترک بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه های MCP ۱۰-۱۰-۳، MCP ۱۰-۱۰-۴، MCP ۱۰-۱۵-۱، MCP ۱۰-۱۵-۳ و MCP ۱۰-۱۵-۴ در شکل های ۱۳ تا ۱۶ مشاهده می شود.



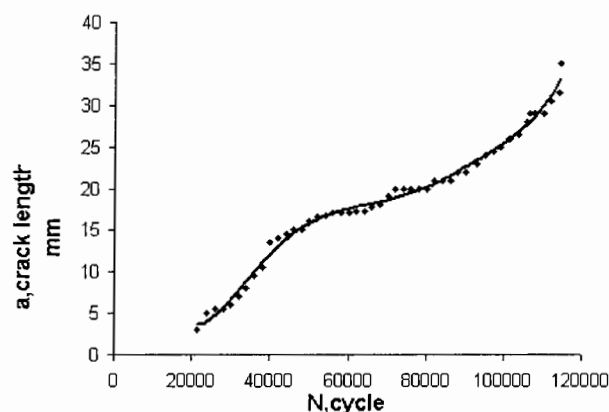
شکل ۱۳- نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل برای نمونه MCP ۱۰-۱۰-۳



شکل ۱۴- نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل برای نمونه MCP ۱۰-۱۰-۴



شکل ۱۵- نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل برای نمونه ۱۰-۱۵-۱ MCP



شکل ۱۶- نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل برای نمونه ۱۰-۱۵-۳ MCP

با توجه به این دو نمودار می توان رابطه ای بین طول ترک a و تعداد سیکل بارگذاری N بدست آورد که در ادامه برای هر حالت این رابطه آورده شده است. همچنین می توان با مشتق گرفتن از روابط فوق الذکر، روابطی تجربی بین تغییرات طول ترک نسبت به تغییرات سیکل (da/dN) و دامنه ضریب شدت تنش ΔK را بصورت زیر بدست آورد:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m$$

که در آن c و m ثابت های ماده می باشد.

این رابطه از آن جهت اهمیت دارد که می توان از آن برای پیش بینی عمر خستگی در نمونه ها استفاده نمود. در ادامه روابط بدست آمده برای طول ترک و رشد ترک خستگی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای چند نمونه آورده شده است.

- رابطه طول ترک بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه ۱۰-۳-۱۰ MCP:

$$a = 1.2536e^{2 \times 10^{-5} N}$$

• رابطه طول ترک با سیکلهای خستگی برای نمونه ۱۰-۱۰-۴ MCP:

$$a = 5 \times 10^{-27} N^6 - 1 \times 10^{-21} N^5$$

$$a = 5 \times 10^{-27} N^6 - 1 \times 10^{-21} N^5 - 7 \times 10^{-12} N^3 + 2 \times 10^{-7} N^2 - 0.0018N + 11.075$$

• رابطه طول ترک با سیکلهای خستگی برای نمونه ۱۰-۱۵-۱ MCP:

$$a = -2 \times 10^{-28} N^6 + 2 \times 10^{-22} N^5 - 1 \times 10^{-16} N^4$$

$$+ 2 \times 10^{-11} N^3 - 3 \times 10^{-6} N^2 + 0.2018N - 5726.8$$

• رابطه طول ترک با سیکلهای خستگی برای نمونه ۱۰-۱۵-۳ MCP:

$$a = 2 \times 10^{-28} N^6 - 8 \times 10^{-23} N^5 + 2 \times 10^{-17} N^4$$

$$- 2 \times 10^{-12} N^3 + 8 \times 10^{-8} N^2 - 0.0011N + 4.2174$$

با مشتق گرفتن از روابط فوق نسبت به N به ترتیب روابط زیر برای نرخ رشد ترک خستگی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه های فوق الذکر بدست می آید:

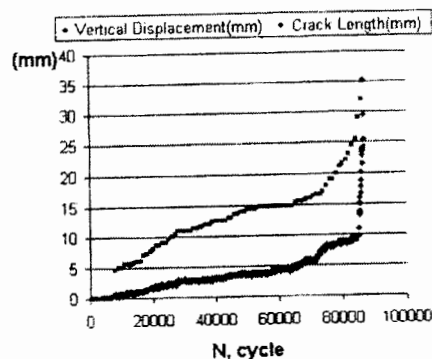
$$\frac{da}{dN} = 2.51 \times 10^{-5} e^{2 \times 10^{-5} N}$$

$$\frac{da}{dN} = 3 \times 10^{-26} N^5 - 5 \times 10^{-21} N^4 - 2.1 \times 10^{-11} N^2 + 4 \times 10^{-7} N - 0.0018$$

$$\frac{da}{dN} = -1.2 \times 10^{-27} N^5 + 1 \times 10^{-21} N^4 - 4 \times 10^{-16} N^3 + 6 \times 10^{-11} N^2 - 6 \times 10^{-6} N + 0.2018$$

$$\frac{da}{dN} = 1.2 \times 10^{-27} N^5 - 4 \times 10^{-22} N^4 + 8 \times 10^{-17} N^3 - 6 \times 10^{-12} N^2 + 1.6 \times 10^{-7} N - 0.0011$$

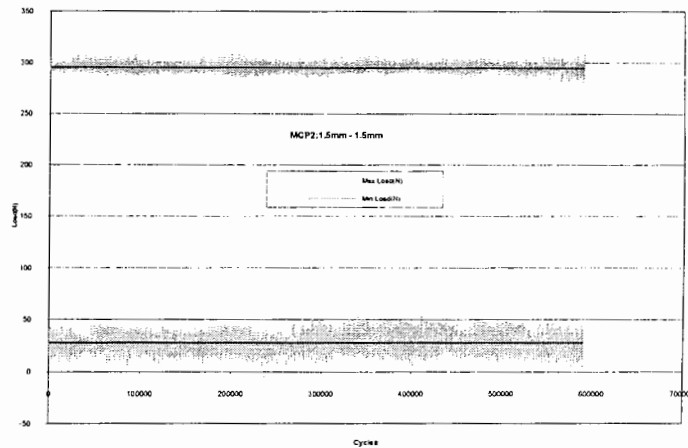
در طی آزمایشها، نمودارهای جابجایی عمودی نمونه ها بر حسب تعداد سیکل بارگذاری نیز بدست آمده است که شاید بتوان بین این نمودارها با طول ترک خستگی رابطه ای منطقی بدست آورد. یک نمونه از این نمودارها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، رفتار دو نمودار تقریباً مشابه یکدیگر می باشد.



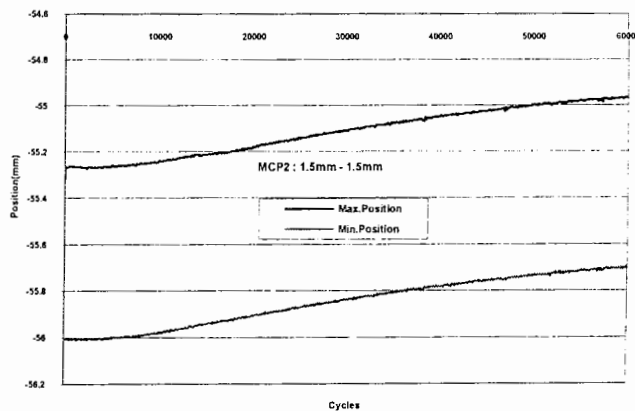
شکل ۱۷ - مقایسه بین نمودارهای طول ترک و جابجایی عمودی برای نمونه ۱۰-۱۰-۴ MCP

• پیش بینی شروع انتشار ترک خستگی

شکل ۱۸، نمودار بار برحسب تعداد سیکل بارگذاری نمونه $1/5 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$ MCP2 را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد، بدلیل پایین بودن سطح بار و همچنین کم بودن سفتی (Stiffness) نمونه های MCP، نوسان هایی در مقادیر حداقل و حداکثر بار مشاهده می گردد که البته مقدار میانگین آن، تقریباً همان بار مورد نظر است. شکل ۱۹، بخشی از نمودار جابجایی برحسب تعداد سیکل بارگذاری نمونه $1/5 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$ MCP2 را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد، در ابتدا نمودار به صورت یک خط افقی می باشد؛ ولی از حدود ۱۰۰۰۰ سیکل به بعد، شیب نمودار مثبت شده و رفتار آن تغییر کرده است. آن نقطه ای که شیب نمودار مثبت شده است را می توان به عنوان شروع انتشار ترک فرض کرد.

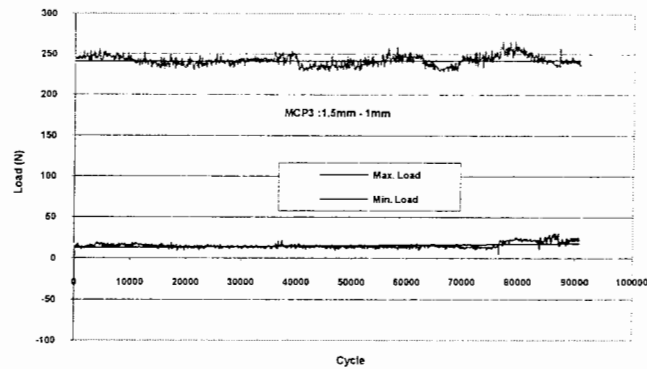


شکل ۱۸- نمودار بار برحسب تعداد سیکل بارگذاری
برای نمونه $1/5 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$ MCP2

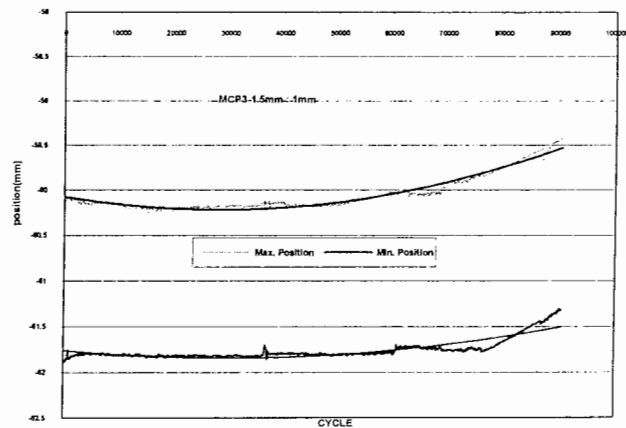


شکل ۱۹- نمودار جابجایی برحسب تعداد سیکل بارگذاری
برای نمونه $1/5 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$ MCP

شکل ۱۹ نیز نمودار بار برحسب تعداد سیکل بارگذاری نمونه $MCP: 1/5 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$ را نشان می دهد. شکل ۲۱ نیز نمودار جابجایی برحسب تعداد سیکل بارگذاری نمونه $MCP: 1/5 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$ را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد، شروع انتشار ترک از تعداد سیکل بارگذاری حدود ۴۰۰۰۰ سیکل شروع می گردد.

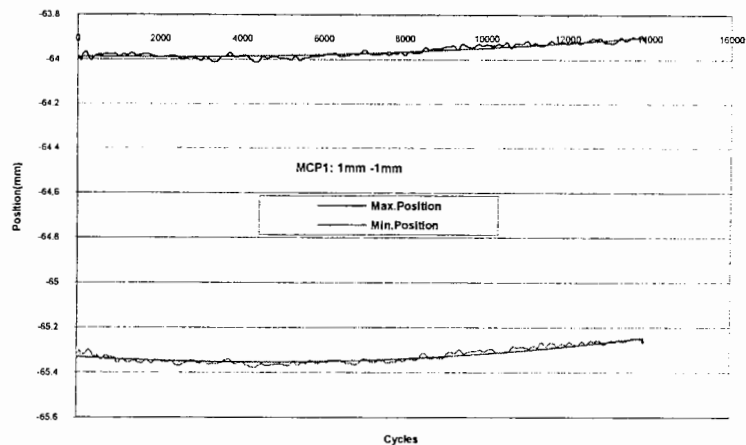


شکل ۲۰- نمودار بار برحسب تعداد سیکل بارگذاری
برای نمونه $MCP: 1/5 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$



شکل ۲۱- نمودار جابجایی برحسب تعداد سیکل بارگذاری
برای نمونه $MCP: 1/5 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$

شکل ۲۲ نیز بخشی از نمودار جابجایی برحسب تعداد سیکل بارگذاری نمونه $MCP: 1 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$ را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد، شروع انتشار ترک از تعداد سیکل بارگذاری حدود ۶۰۰۰ سیکل شروع می گردد. قابل توجه اینکه حداکثر بار اعمالی به این نمونه 150 N بوده است.



شکل ۲۲- نمودار جابجایی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری
برای نمونه MCP : ۱ mm - ۱ mm

۴-۴ بحث و بررسی

با بررسی نتایج تجربی بدست آمده می توان مباحث زیر را مورد بررسی قرار داد :

۱- در جدول (۴) طول عمر ترک تا رسیدن به سطح نمونه N_p و طول عمر نهایی ترک N_t آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول مشاهده می گردد که در نمونه های با طول عمر زیاد (بار اعمالی کم)، مرحله جوانه زنی و رشد ترک در داخل نمونه، حدود نیمی از طول عمر نهایی را شامل می شود، این در حالی است که در نمونه های با طول عمر کم (بار اعمالی زیاد)، مراحل جوانه زنی و رشد ترک تا سطح نمونه، بطور میانگین در حدود ۱۶/۵ درصد از عمر نهایی نمونه ها را تشکیل می دهد.

جدول (۴): طول عمر ترک در مرحله جوانه زنی و رشد تا قابل رویت شدن ترک در روی سطح، برای $R=0.01$

$\frac{N_p}{N_t} \times 100$	عمر نهایی، N_t	N_p ، سیکلی که ترک در سطح نمونه قابل رویت میشود.	حداکثر بار اعمالی (N)	نوع نمونه MCP
۵۰/۴۴	۳۴۳۸۳۸	۱۷۳۴۲۶	۱۵۰	۱mm-۱mm
۲۴/۱۷	۱۷۳۹۸۱	۳۰۰۰۰	۲۰۰	
۴۲/۹	۸۶۳۴۸	۸۱۳۴	۲۵۰	
۱/۵۴	۲۳۶۳۸۱	۱۲۷۸۵۴	۱۵۰	۱mm-۱/۵mm
۲۴/۱۹	۱۱۰۳۲۶	۲۱۲۲۹	۲۰۰	
۲۰	۶۱۴۰۰	۱۲۲۷۹	۲۵۰	

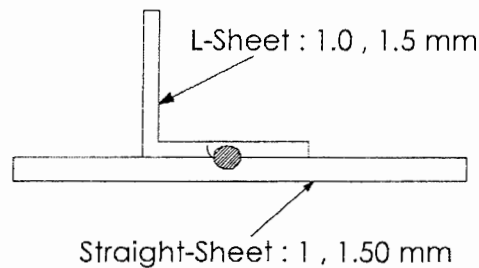
۲- ترک ها بصورت کاملاً رشد یافته و ناگهانی به سطح خارجی می رسند، بطوریکه امکان اندازه گیری ترکهای ریز (کمتر از ۲ mm) با استفاده از روش چشمی (مانند آنچه در این آزمایش ها استفاده شد) موجود نمی باشد. بطور متوسط، ترکها وقتی در سطح بیرونی نمونه نمایان می شدند، طولی در حدود ۲٫۵ تا ۴ میلیمتر داشتند.

۳- محل ترکها در سطح خارجی، در دور دکمه جوش و در سمت لبه عمودی می باشد.

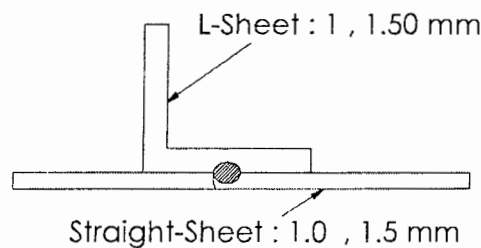
۴- ترکها بصورت کماتی شکل حول دکمه جوش رشد کرده و سپس به موازات لبه عمودی به رشد خود تا شکست کامل ادامه می دهد.

۵- در تمام نمونه ها مطابق شکل های ۲۳ تا ۲۵، جوانه زنی و رشد ترک در اطراف نقطه جوش و از سمتی که تنش های مثبت کششی اعمال می شد، ایجاد شده است.

۶- جوانه زنی و رشد ترک همواره در ورق نازکتر اتفاق می افتد (شکل های ۲۳ و ۲۴ را ببینید).



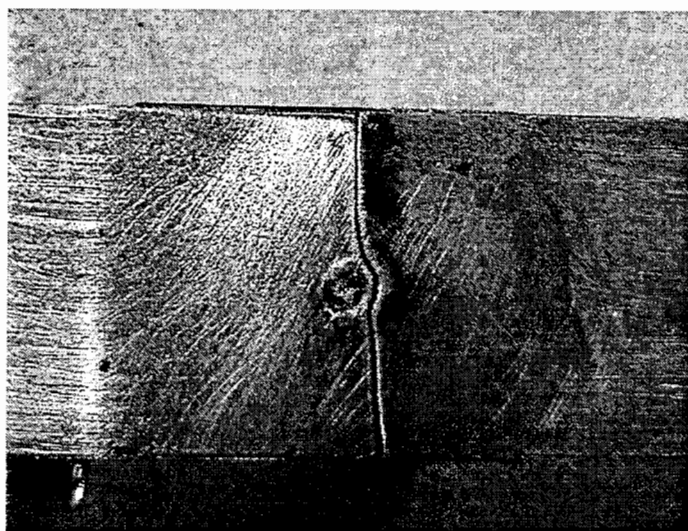
(الف)



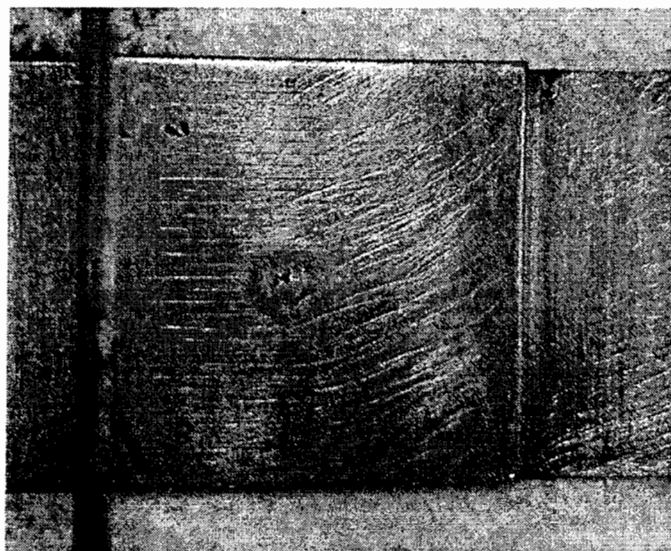
(ب)

شکل ۲۳- محل جوانه زنی و رشد ترک در اطراف نقطه جوش. در هر دو حالت، شروع و رشد ترک در ورق نازکتر بوده است.

شکل های ۲۴- (الف و ب)، نمونه ای را نشان می دهد که ضخامت ورق L شکل در آن ۱/۵ میلیمتر و ضخامت ورق صاف ۱ میلیمتر بوده است. همانطور که مشاهده می شود ترک فقط در نمونه با ضخامت کمتر ایجاد شده است و در ورق ضخیم هیچ نشانه ای از رشد ترک دیده نمی شود.

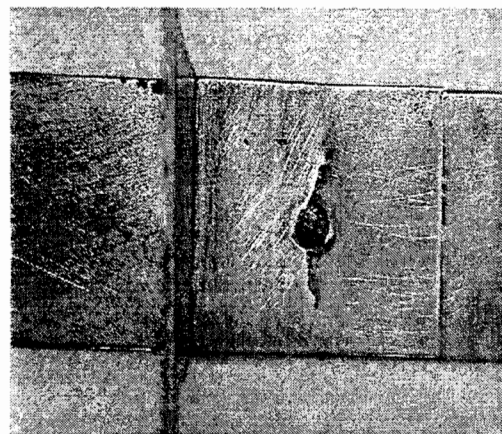
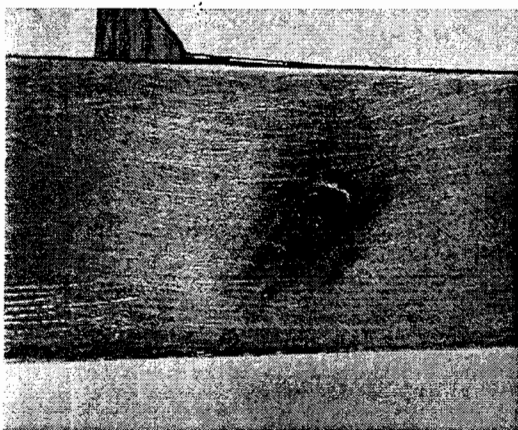


(الف) - نحوه رشد ترک در ورق صاف با ضخامت ۱ میلی‌متر



(ب) - در ورق L شکل با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر هیچ ترکی مشاهده نمی‌گردد

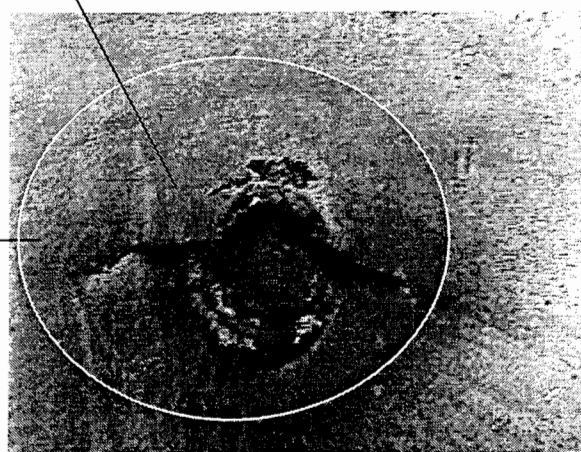
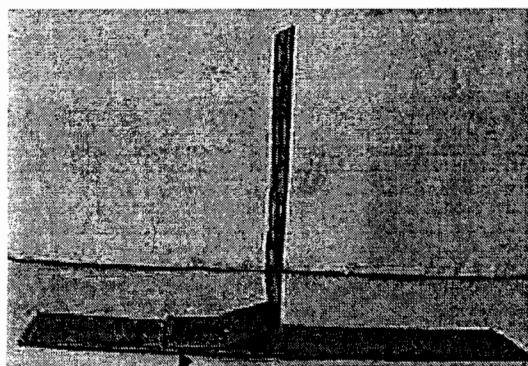
شکل‌های ۲۴- (ج و د)، نمونه‌ای را نشان می‌دهد که ضخامت ورق L شکل در آن ۱ میلی‌متر و ضخامت ورق صاف ۱/۵ میلی‌متر بوده است. همانطور که مشاهده می‌شود ترک فقط در نمونه با ضخامت کمتر ایجاد شده است و در ورق ضخیم هیچ نشانه‌ای از رشد ترک دیده نمی‌شود.



(د) - در ورق صاف یا ضخامت ۱ میلی‌متر هیچ ترکی مشاهده

(ج) - نحوه رشد ترک در ورق L شکل با ضخامت ۱ میلی‌متر
نمیگردد

شکل ۲۴ - نحوه رشد ترک در نمونه های U شکل



شکل ۲۵ - محل جوانه‌زنی و رشد ترک در یک نمونه واقعی

۴-۵ نتایج

از بررسی و مشاهده سطوح و مقاطع شکست، نتایج زیر حاصل می‌شود:

- ۱- در نمونه‌های با ضخامت متفاوت، ترک همواره در ورقه نازک شروع می‌شود و ورقه نازک در انتها دچار شکست می‌گردد.
- ۲- در نمونه‌های با ضخامت یکسان، ترک در هر دو ورقه ایجاد می‌گردد، اما معمولاً در صورتی که بار کم باشد (تعداد سیکل‌های خستگی زیاد) شکست خستگی در ورقه صاف رخ می‌دهد و در صورتی که بار زیاد باشد (تعداد سیکل‌های خستگی کم) شکست در ورقه L شکل رخ می‌دهد.
- ۳- ترک بصورت کماتی شکل در اطراف دکمه جوش رشد می‌کند و شکست در ورقه اتفاق می‌افتد، نه در جوش نقطه‌ای.
- ۴- در نمونه‌های با ضخامت ورق متفاوت، همواره ترک در ورق نازک‌تر شروع می‌شود و رشد می‌کند.
- ۵- در نمونه‌های با ضخامت ورق یکسان، غالباً ترک در ورق L شکل ایجاد می‌شود و البته گاهی هم در ورق صاف که موارد آن در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.
- ۶- طول ترک در ورق‌های با ضخامت یکسان، در هر دو نمونه تقریباً یکسان بود.
- ۷- در بارهای کم، ترک از اطراف نقطه جوش جوانه می‌زد و سپس در حد قابل توجهی به درون ورق انتشار می‌یافت و در نهایت شکست کامل اتفاق می‌افتاد. ولی هر قدر مقدار بار افزایش می‌یافت، مقدار انتشار ترک در ورق کمتر می‌شد، بطوری که در بارهای نسبتاً زیاد، ترک فقط در اطراف نقطه جوش (Nugget) به مقدار کمی رشد می‌کرد و سپس ناگهان شکست اتفاق می‌افتاد.

فصل پنجم

تحقیق تجربی انجام شده بر روی نمونه های متقارن "U شکل"^۱ به منظور بررسی رفتار رشد ترک و طول عمر خستگی

۱-۵ مقدمه

در این تحقیق رفتار رشد ترک و طول عمر خستگی نمونه های نوع U شکل متقارن بطور تجربی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. ورق های استفاده شده دارای ضخامت های متفاوت ۱ و ۱/۵ میلیمتر بودند که به صورت ۱-۱ میلیمتر، ۱-۱/۵ میلیمتر و ۱/۵-۱/۵ میلیمتر توسط فرایند جوشکاری نقطه ای به یکدیگر متصل شدند. جنس نمونه ها از فولاد نرم (Milled Steel) بود. سپس نمونه ها توسط یک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802 با ظرفیت نیروسنج ۲۵ kN تحت بارگذاری متناوب با دامنه ثابت ولی سطح بار مختلف قرار گرفتند. در طول انجام آزمایشات، طول ترک به ازای تعداد سیکل مشخصی توسط یک میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر با دقت اندازه گیری می شد. از نتایج تجربی مشاهده گردید که در نمونه های با ضخامت متفاوت، ترک همواره در ورقه نازک شروع می شود و نیز این ورق نازک است که در نهایت دچار شکست می گردد. همچنین در نمونه های با ضخامت یکسان، ترک در هر دو ورق تقریباً با طولی یکسان ایجاد می گردد. ضمناً استفاده از جوشهای نقطه ای با ضخامت ناهمسان، تغییر چشمگیری در طول عمر خستگی آنها ایجاد نمی کند.

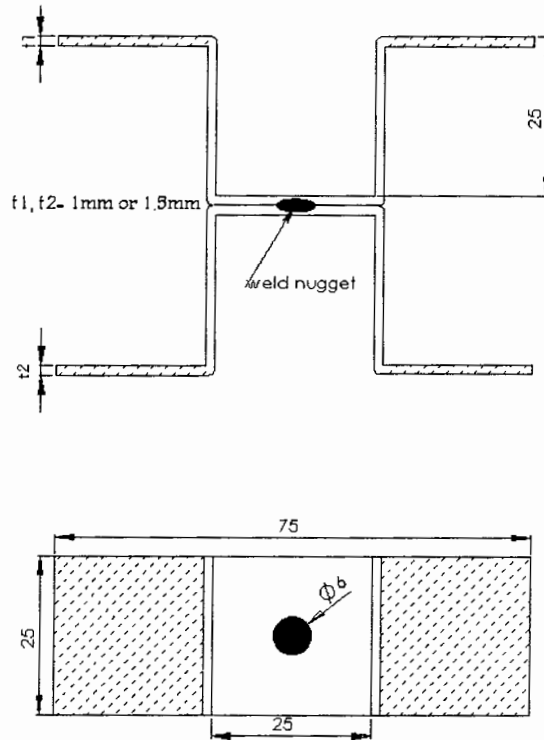
۲-۶ نتایج تجربی

• نمونه های آزمایش

در این تحقیق از نمونه های پارگی پوسته ای متقارن CP استفاده شده است. هدف از این آزمایش، پیش بینی عمر خستگی و تعیین رفتار رشد ترک در نقطه جوش و در عرض ورقه و همچنین بررسی نوع شکست با توجه به قطر دکه جوش^۲ می باشد. شکل ۱ هندسه نمونه مورد آزمایش را نشان می دهد.

^۱ - Symmetric Coach Peel Specimens

^۲ - Nugget



شکل ۱- هندسه نمونه مورد آزمایش

• شرایط جوشکاری نمونه ها

نمونه های آزمایش با استفاده از یک دستگاه جوش نقطه ای پدالی جوشکاری شدند. شرایط جوشکاری به شرح زیر می باشد:

نیرو: بصورت تجربی و توسط اپراتور وارد شد.

جریان جوشکاری: 8 kA .

زمان نگهداری: ۳ ثانیه

قطر الکترود: در این سری از آزمایشات برای ایجاد جوش نقطه ای با قطر متغیر از الکترودهایی با قطر ۴ و ۶ میلیمتر استفاده شد.

جنس نمونه ها: فولاد نرم.

ضخامت ورقه های بکار رفته متفاوت و از دو نوع ورقه با ضخامت ۱ و ۱/۵ میلیمتری استفاده شد.

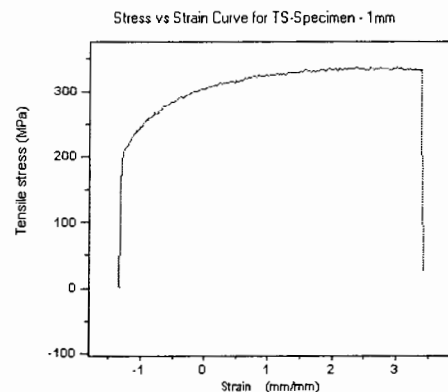
• روش نامگذاری نمونه های U شکل

با توجه به استفاده از ورقه های با دو ضخامت متفاوت، نمونه های U شکل به دو سری که هر سری شامل سه گروه مختلف است، تقسیم بندی شد. سری اول نمونه های با قطر دکمه جوش 4 mm می باشد. این نمونه ها بصورت $UA^{***-***}$ نامگذاری می شود. UA نشانه نمونه های با قطر دکمه جوش ۴ میلیمتر می باشد. عدد اول و عدد دوم ضخامت ورقه های تشکیل دهنده نمونه و عدد سوم شماره نمونه در هر گروه می باشد. سری دوم

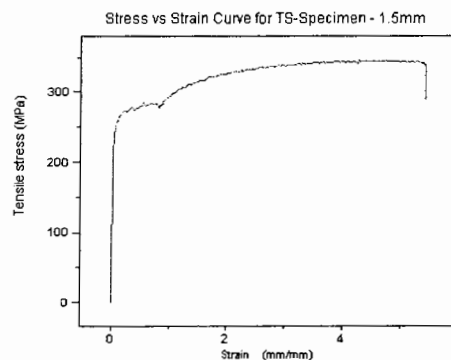
(نمونه های با قطر دکه جوش ۶ میلیمتر) نیز مانند سری اول نامگذاری می گردد، با این تفاوت که نشانه نمونه UB می باشد. به عنوان مثال، نشانه UA-10-15-1 بدین معنی است که ورقی با ضخامت ۱ میلیمتر به ورقی به ضخامت ۱.۵ میلیمتر با قطر نقطه جوش ۴ میلیمتر جوشکاری شده است. عدد ۱ نشان دهنده اولین نمونه از این گروه می باشد.

• خواص ماده

تمامی نمونه های استفاده شده در این تحقیق از جنس فولاد فولاد نرم بودند. آزمایش کشش استاندارد به کمک یک دستگاه INSTRON 8802 توسط مولفین و برطبق استاندارد Standard Test ASTM Methods of Tension of Metallic Materials (E8) به منظور تعیین نمودار تنش- کرنش، انجام شد. برای هر ورق با ضخامت های ۱ و ۱/۵ میلیمتر دو آزمایش کشش انجام شد که برخی از منحنی های بار-جابجایی و تنش-کرنش حاصله در شکل ۲ آورده شده است. حداکثر نیروی متوسط قابل تحمل توسط ورق ۱ میلیمتری برابر ۴۲۴۹ N و ورق ۱/۵ میلیمتری برابر ۶۵۱۶ N بود. عرض نمونه های کشش استاندارد برابر ۱۲/۵ میلیمتر بود.



الف- منحنی تنش - کرنش ورق به ضخامت ۱ mm



ب- منحنی تنش - کرنش ورق به ضخامت ۱/۵ mm

شکل ۲- منحنی های بار-جابجایی و تنش-کرنش برای ماده ورق های نقطه جوش شده در آزمایش کشش ساده

۴-۵ آزمایشهای خستگی

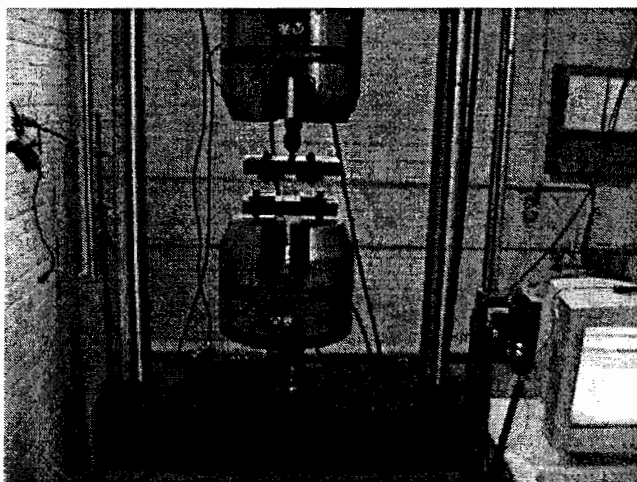
هدف از آزمایشهای خستگی در این تحقیق عبارتند بودند از:

- (۱) تعیین طول عمر خستگی نمونه ها
- (۲) اندازه گیری میزان رشد ترک در عرض نمونه (اندازه گیری رشد ترک از زمانیکه ترک در روی سطح نمونه قابل رویت می شد تا هنگامیکه نمونه دچار شکست کامل می شد، ادامه یافت).

(۳) بررسی نوع شکست با توجه به قطر دکمه جوش

(۴) پیش بینی شروع انتشار ترک خستگی

کلیه آزمایشهای خستگی با استفاده از یک دستگاه سروهیدرولیک *INSTRON 8802* تحت بارگذاری با دامنه ثابت انجام شدند. همچنین آزمایشها در حالت کنترل بار و با فرکانس 10^4 Hz انجام شدند. نحوه قرار گرفتن نمونه ها در دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نحوه قرار گرفتن نمونه ها در دستگاه تست خستگی

• نتایج تعیین طول عمر خستگی و نوع شکست نمونه ها

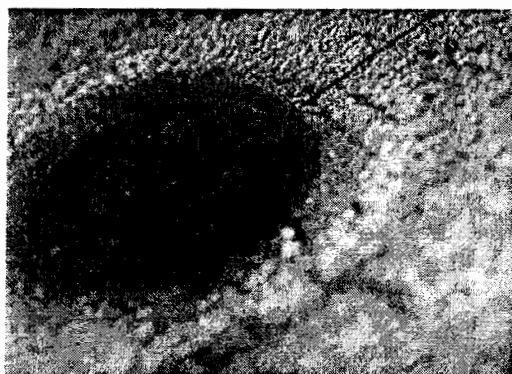
در این بخش هدف از انجام آزمایش تعیین طول عمر خستگی و شناسایی رفتار خستگی در نمونه های U شکل حاوی اتصالات جوش نقطه ای بررسی می گردد.

نتایج آزمایشات برای نمونه های U شکل در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول علاوه بر طول عمر خستگی نمونه ها، نوع شکست نهایی هر نمونه نیز ثبت شده است.

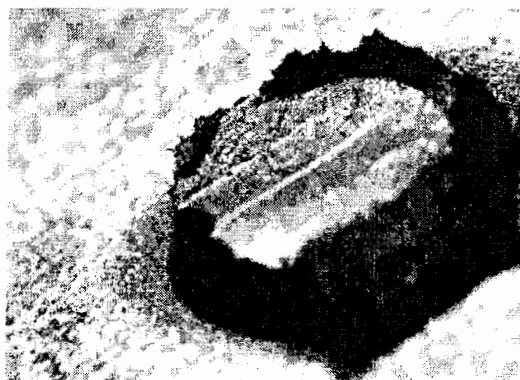
بطور کلی در نمونه های U شکل دو نوع شکست مشاهده شد:

۱) شکست دکمه جوش ۱: این نوع شکست بدلیل کوچک بودن قطر دکمه جوش رخ می دهد. این شکست در فصل مشترک دکمه جوش دو ورقه اتصالی بوجود می آید. این نوع شکست بصورت کاملاً ناگهانی و بدون رشد ترک در ورقه های متصل شده رخ می دهد. (شکل ۴-ا)

۰) بیرون افتادگی دکمه جوش ۲: در این نوع شکست ابتدا ترک در ضخامت ورقه کاملاً رشد می کند و پس از رسیدن به سطح نمونه و رشد قابل توجه در عرض نمونه، بدلیل کاهش استحکام نمونه، دکمه جوش از جای خود خارج شده و شکست رخ می دهد. (شکل ۴-ب).



(a) Nugget Fracture



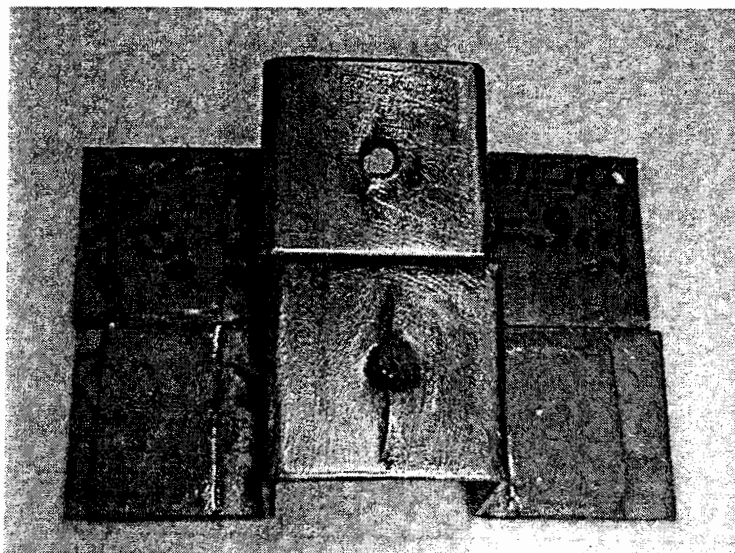
(b) Nugget Pull Out

شکل ۴ - انواع شکست دکمه جوش

همچنین نحوه رشد ترک در چند نمونه نوع U در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۵- (الف)، نمونه UB15-15-4 را نشان می دهد که ضخامت هر دو ورق در آن ۱/۵ میلیمتر است و تحت تاثیر نیروی حداکثر برابر ۹۰۰ نیوتن قرار گرفته و ۲۰۷۳۰ سیکل بارگذاری را تحمل کرده است. همانطور

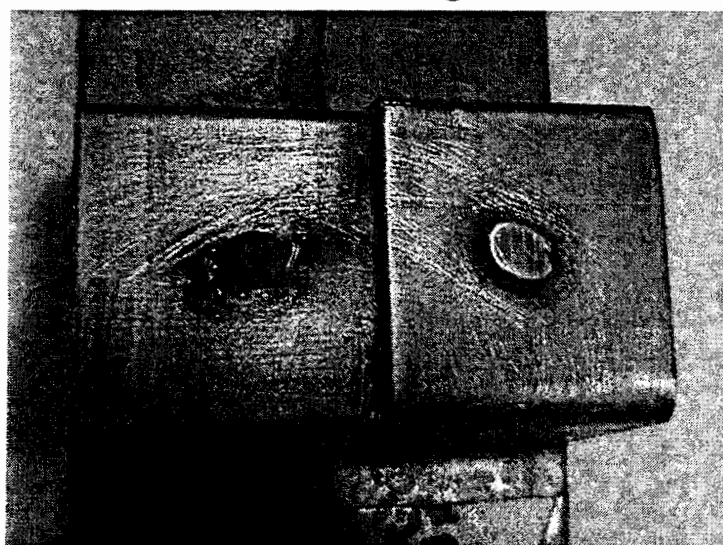
1. Nugget Fracture
2. Nugget Pull Out

که مشاهده می شود ترک در هر دو ورق ایجاد شده است ولی در یکی از آنها رشد بیشتری داشته است و ترک عرض نمونه را تا حد زیادی طی کرده است.



(الف) - نحوه رشد ترک در ورق های با ضخامت ۱/۵ میلیمتر

شکل ۵- (ب)، نمونه UB10-15-2 را نشان می دهد که ضخامت یکی از ورق ها ۱ میلیمتر و دیگری ۱/۵ میلیمتر است و تحت تاثیر نیروی حداکثر برابر ۶۵۰ نیوتن قرار گرفته و ۱۵۹۲۲ سیکل بارگذاری را تحمل کرده است. همانطور که مشاهده می شود قبل از آنکه ترک بتواند در آن رشد کند، ورق نازکتر (سمت چپ) دچار پارگی شده است در حالی که ورق ضخیمتر هیچ آسیبی ندیده است.



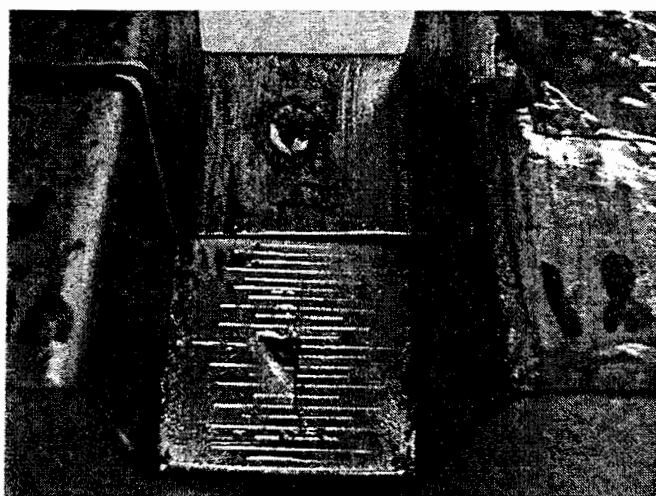
(ب) - نحوه ایجاد زوال در دو ورق با ضخامتهای ۱ و ۱/۵ میلیمتر مشاهده نمی گردد

شکل ۵- (ج)، نمونه U10-10-1 را نشان می دهد که ضخامت هر دو ورق ۱ میلیمتر است و تحت تاثیر نیروی حداکثر برابر ۶۵۰ نیوتن قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می شود قبل از آنکه ترک بطور قابل توجهی در ورق ها رشد کند، هر دو ورق بدلیل نازک بودن، دچار پارگی شده است.



(ج) - نحوه رشد ترک در ورق های با ضخامت ۱ میلیمتر

شکل ۵- (د)، نمونه U15-15-2 را نشان می دهد که ضخامت هر دو ورق ۱/۵ میلیمتر است و تحت تاثیر نیروی حداکثر برابر ۶۵۰ نیوتن قرار گرفته و ۳۴۲۸۸۱ سیکل بارگذاری را تحمل کرده است. همانطور که مشاهده می شود ترک بطور قابل توجهی در یکی از ورق ها رشد کرده است ولی در ورق دیگر ترکی مشاهده نمی گردد.



(د) - نحوه رشد ترک در ورق های با ضخامت ۱/۵ میلیمتر

شکل ۵- نحوه رشد ترک در نمونه های U شکل

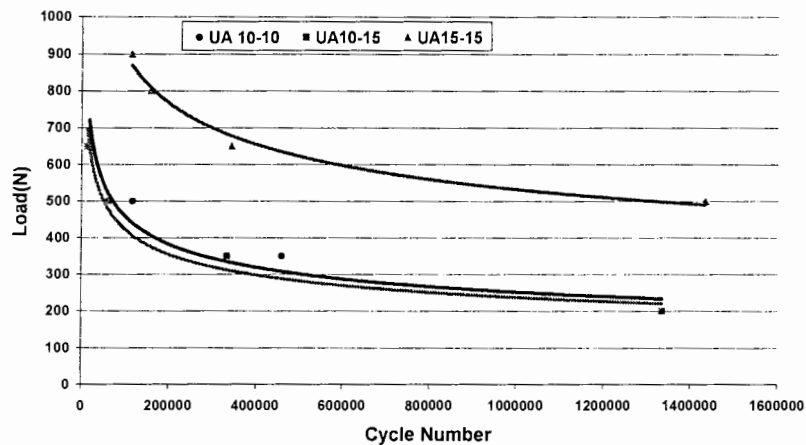
جدول ۱- نتایج طول عمر خستگی برای نمونه های CP متقارن

طول نهایی ترک مشاهده شده در سطح نمونه (mm)	نوع شکست	نسبت بار R	تعداد سیکل N_f بارگذاری تا شکست نمونه	حداکثر نیروی اعمالی (N)	نوع نمونه، شکل U
۴	Nugget pull out	۰,۰۲	۱۳۳۵۲۵۵	۲۰۰	۱ mm-۱ mm
۲۵	Nugget pull out	۰,۲,۰	۴۵۸۴۶۳	۳۵۰	
۲۳	Nugget pull out	۰,۴,۰	۱۱۶۳۳۵	۵۰۰	
۱۱,۵	Nugget pull out	۰,۲,۰	۱۷۵۵۷	۶۵۰	
۶	Nugget pull out	۰,۲,۰	۱۳۳۵۰۰۰	۲۰۰	۱ mm-۱ mm, ۱ mm-۱ mm
۱۸	Nugget pull out	۰,۲,۰	۳۳۳۱۸۲	۳۵۰	
۱۸	Nugget pull out	۰,۲,۰	۶۰۹۳۳	۵۰۰	
۵,۷	Nugget Fracture	۰,۱,۰	۱۳۵۴۹	۶۵۰	
۲۵	Nugget pull out	۰,۱,۰	۱۴۳۴۰۰۰	۵۰۰	۱ mm-۱ mm, ۱ mm-۱ mm
۱۵	Nugget pull out	۰,۱,۰	۳۴۲۸۸۱	۶۵۰	
۱۸,۵	Nugget pull out	۰,۱,۰	۱۵۶۵۹۲	۸۰۰	
۱۰,۵	Nugget pull out	۰,۱,۰	۱۱۳۴۳۵	۹۰۰	

سری UA

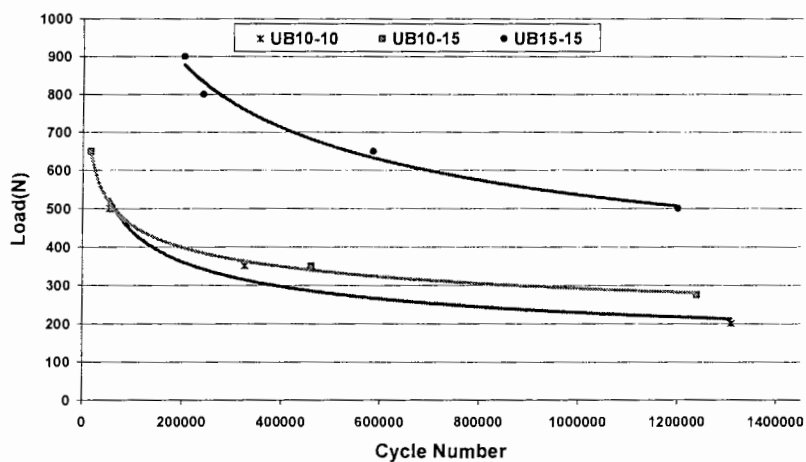
۶۵	Nugget pull out	۰,۲,۰	۱۳۰۸۸۱۶	۲۰۰	۱ mm-۱ mm	سری UB
۲۵	Nugget pull out	۰,۲,۰	۳۲۵۸۹۰	۳۵۰		
۸۵	Nugget pull out	۰,۲,۰	۵۳۷۶۶	۵۰۰		
-	-	-	-	-		
۱۰	Nugget pull out	۰,۰,۲	۱۲۳۸۹۰۰	۲۷۵	mm۵,۱ mm-۱	
۲۰	Nugget Fracture	۰,۰,۴,۰	۴۶۰۱۳۵	۳۵۰		
۱۱	Nugget pull out	۰,۱,۰	۵۸۳۳۸	۵۰۰		
۸	Nugget pull out	۰,۰,۵,۰	۱۵۹۲۲	۶۵۰		
۲۵	Nugget Fracture	۰,۱,۰	۱۱۹۹۳۴۶	۵۰۰	mm۵,۱ mm-۵,۱	
۷	Nugget Fracture	۰,۱,۰	۵۸۴۲۴۳	۶۵۰		
۸	Nugget Fracture	۰,۱,۰	۲۴۰۴۱۱	۸۰۰		
۱۹	Nugget pull out	۰,۱,۰	۲۰۲۷۳۰	۹۰۰		

در شکل ۶، نمودار بار بر حسب عمر خستگی برای بعضی از نمونه‌های UA شکل ارائه شده است.



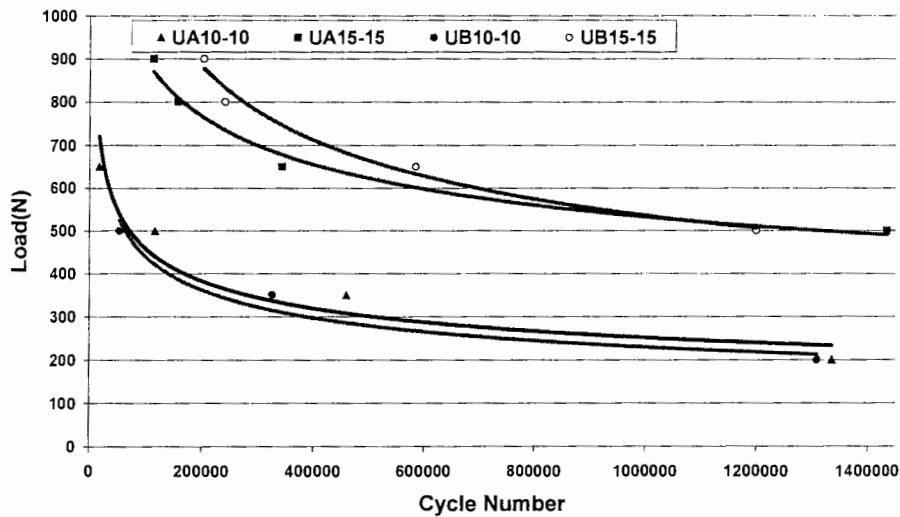
شکل ۶- نمودار بار بر حسب طول عمر خستگی برای نمونه های UA

در شکل ۷، نمودار بار بر حسب عمر خستگی برای بعضی از نمونه‌های UB شکل ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار بار بر حسب طول عمر خستگی برای نمونه های UB

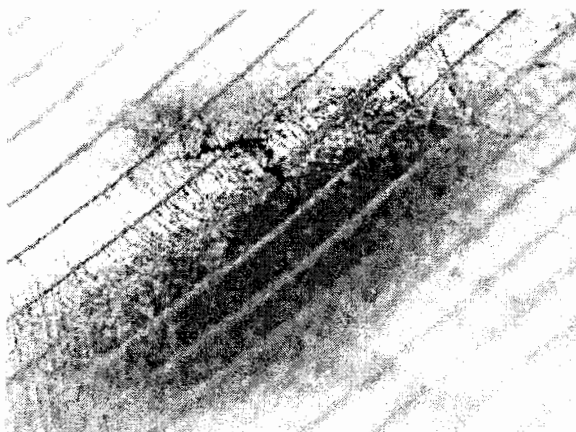
در شکل ۸، مقایسه ای بین طول عمر خستگی برای بعضی از نمونه‌های UA و UB ارائه شده است.



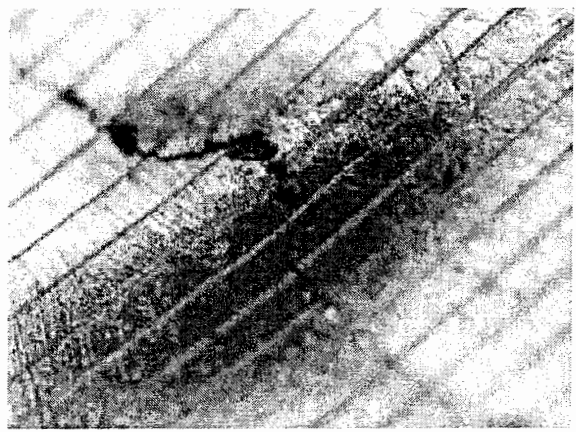
شکل ۸- مقایسه طول عمر خستگی برای بعضی از نمونه های UA و UB

• اندازه گیری رشد ترک خستگی

همزمان با انجام آزمایشها سطح نمونه با استفاده از یک میکروسکوپ *NIKON SMZ-1* با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر و بوسیله یک دوربین دیجیتالی بصورت تصویری کنترل می شد. برای اینکه بتوان رشد ترک را با وضوح بیشتری مشاهده کرد، سطح تمامی قطعات در اطراف جوش نقطه ای با استفاده از سمباده درشت و نرم صیقلی گردید. همچنین برای اینکه در طول بارگذاری، طول ترک براحتی قابل اندازه گیری باشد در روی سطح نمونه ها با استفاده از کولیزی دقیق، خطوطی به فاصله ۱ میلیمتر از یکدیگر ایجاد گردید. در شکل های ۹ و ۱۰ چند نمونه از تصاویر رشد ترک بر روی سطح نمونه به ازای تعداد سیکل های بارگذاری مختلف نشان داده شده است.

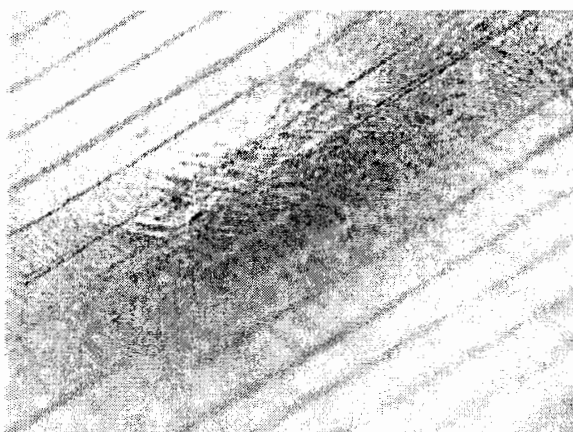


Cycle Number: 1365000

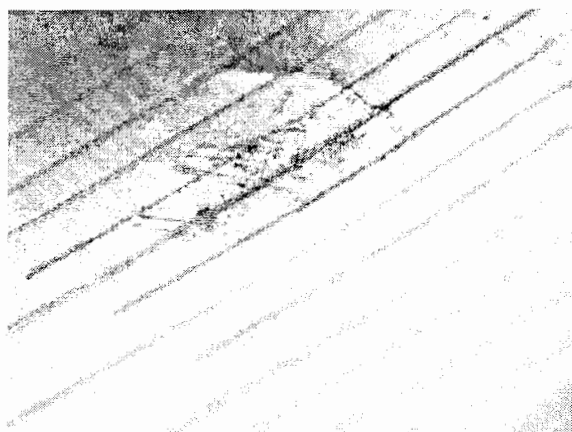


Cycle Number: 1400000

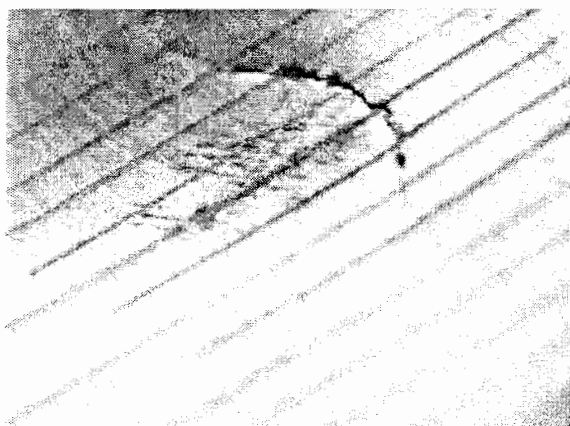
شکل ۹- تصاویر نمونه UA15-15-1 حین بارگذاری



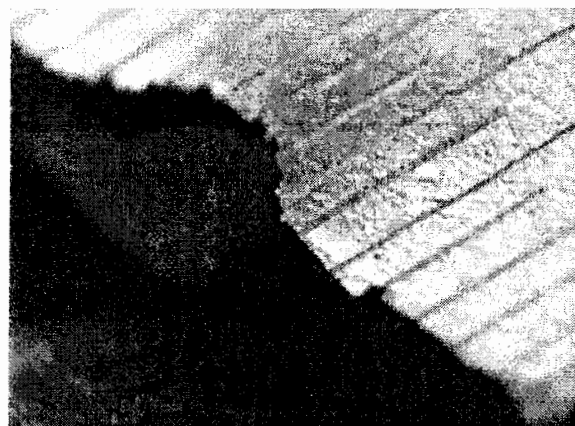
Cycle Number: 230000



Cycle Number: 260000



Cycle Number: 300000

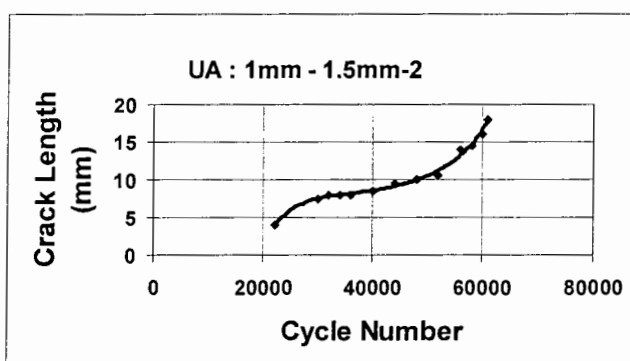


Cycle Number: 325890

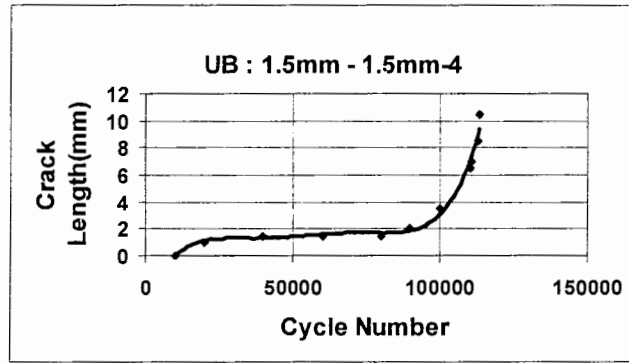
شکل ۱۰- تصاویر نمونه UB10-10-2 در حین بارگذاری

۴-۵ بررسی رفتار رشد ترک خستگی نسبت به تعداد سیکل بارگذاری

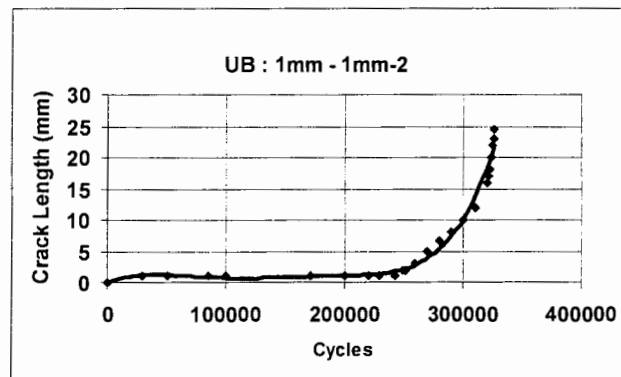
در شکل های ۱۱ تا ۱۵ ، نمودارهای طول ترک بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای بعضی از نمونه ها آورده شده است.



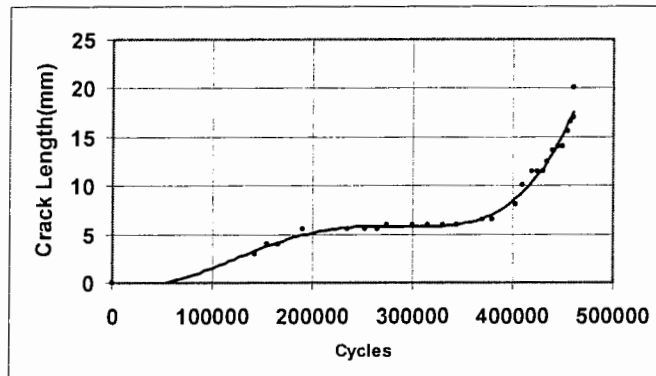
شکل ۱۱ - نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل، نمونه UA10-15-2



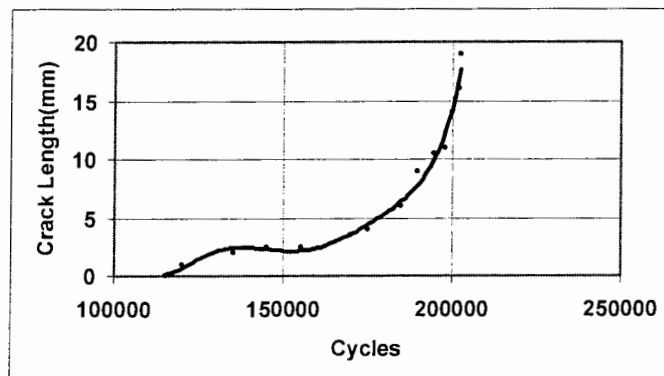
شکل ۱۲ - نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل، نمونه 4-15-15UA



شکل ۱۳ - نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل، نمونه 2-10-10UB



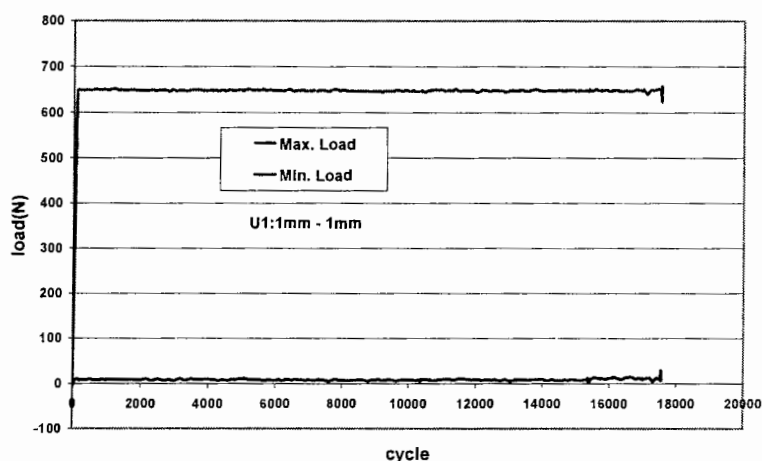
شکل ۱۴ - نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل، نمونه 1-15-10UB



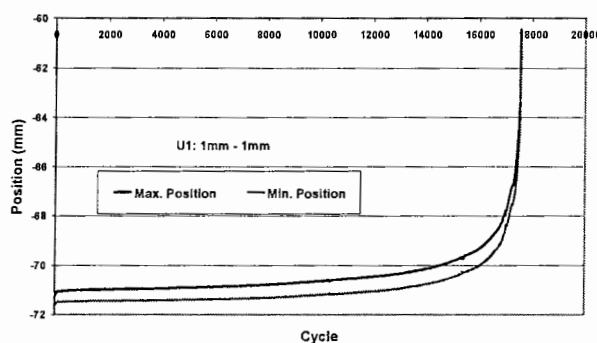
شکل ۱۵ - نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل، نمونه 4-15-15UB

۵-۵ پیش بینی شروع انتشار ترک خستگی

هر نمونه قبل از شروع ترک دارای سفتی (Stiffness) مشخصی می باشد. پس از شروع ترک و رشد آن، سفتی نمونه تغییر می یابد، بطوری که هر قدر طول ترک بیشتر می شود، سفتی نمونه کاهش می یابد. لذا از همین خاصیت نمونه ها می توان شروع انتشار ترک خستگی را اندازه گرفت. اگر نمودارهای جابجایی عمودی نمونه ها بر حسب تعداد سیکل بارگذاری را ترسیم نماییم، نقطه ای که در آن شیب نمودار از مقداری تقریباً صفر به یک مقدار مثبت افزایش می یابد، نقطه شروع انتشار ترک است. این موضوع در شکل های ۱۶ تا ۲۴ تا آورده شده است. کلیه شکل های (الف)، محدوده بارگذاری بر روی نمونه ها را نشان می دهد که در آن مقدار بار حداکثر و حداقل مشخص شده است. همچنین کلیه شکل های (ب)، نمودارهای مربوط به تغییرات سفتی است که در آنها تغییر در شیب منحنی جابجایی-تعداد سیکل بارگذاری، نشان دهنده تغییر در مقدار سفتی نمونه می باشد. به عنوان مثال در شکل ۱۷، حداکثر مقدار بار اعمالی برابر 350 N است و با توجه به شکل ۱۷- (ب)، شروع انتشار ترک تقریباً در ۹۰۰۰ سیکل بارگذاری بوده است.



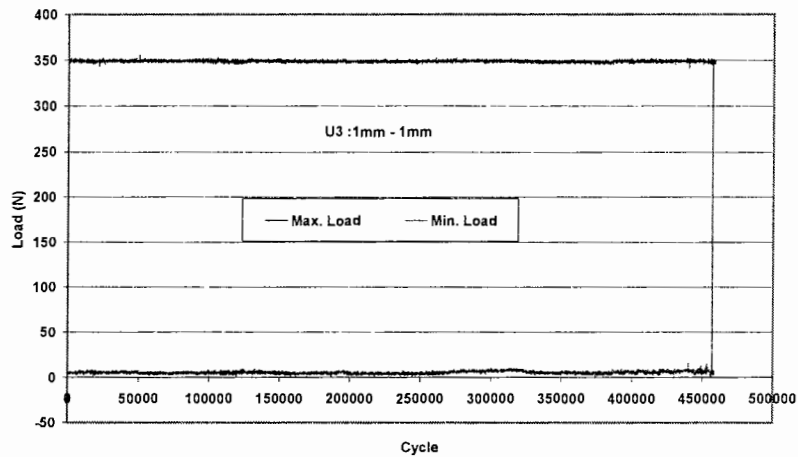
(الف) - نمودار بار-تعداد سیکل برای نمونه $1\text{ mm} - 1\text{ mm}$ UA1



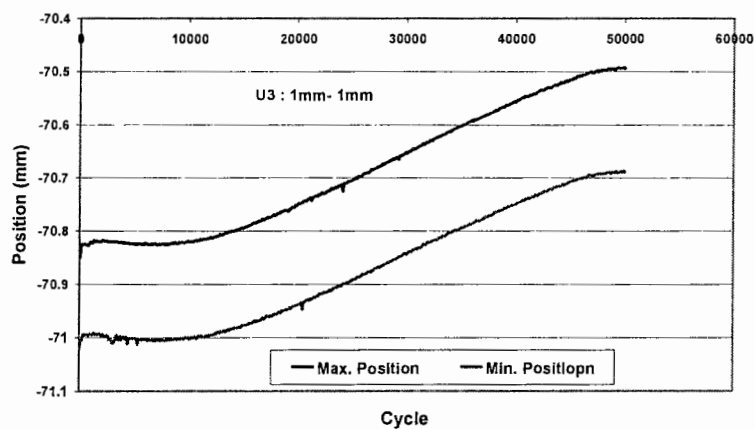
(ب) - نمودار جابجایی-تعداد سیکل برای نمونه $1\text{ mm} - 1\text{ mm}$ UA1

(شروع انتشار ترک تقریباً در ۴۰۰۰ سیکل)

شکل ۱۶- نمودارهای بار-تعداد سیکل و جابجایی-تعداد سیکل برای نمونه $1\text{ mm} - 1\text{ mm}$ UA1

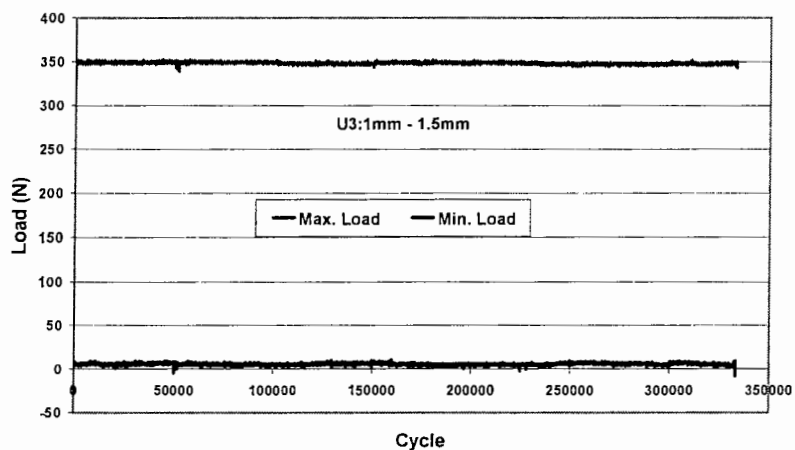


(الف) - نمودار بار- تعداد سیکل برای نمونه UA3 : 1 mm - 1 mm

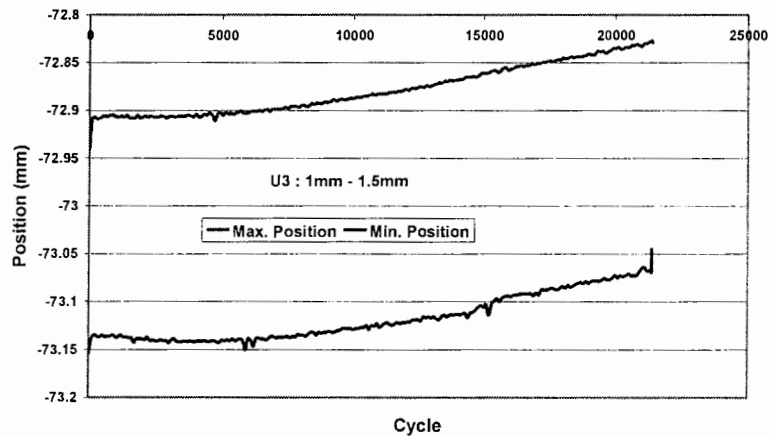


(ب) - نمودار جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UA3 : 1 mm - 1 mm
(شروع انتشار ترک تقریباً در ۹۰۰۰ سیکل)

شکل ۱۷- نمودار های بار- تعداد سیکل و جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UA3 : 1 mm - 1 mm



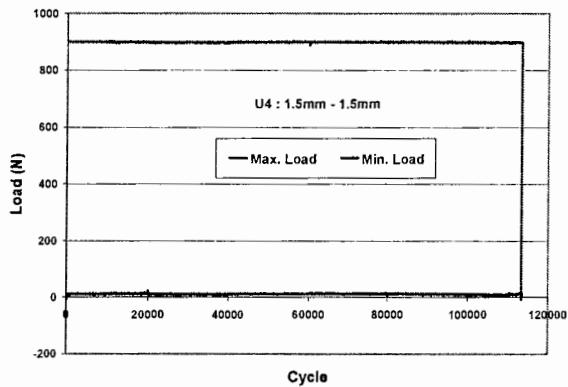
(الف) - نمودار بار- تعداد سیکل برای نمونه UA3 : 1 mm - 1/5 mm



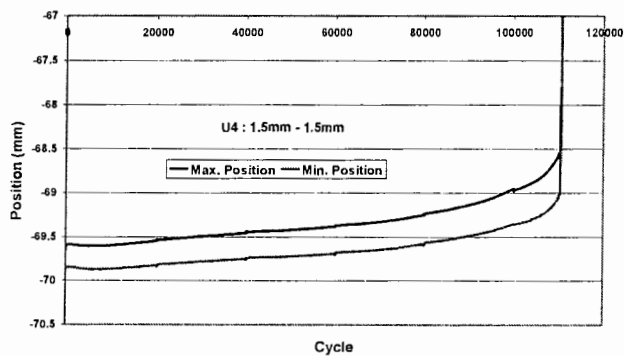
(ب) - نمودار جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UA3 : 1 mm - 1/5 mm

(شروع انتشار ترک تقریباً در 6000 سیکل)

شکل ۱۸- نمودار های بار- تعداد سیکل و جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UA1 : 1 mm - 1 mm



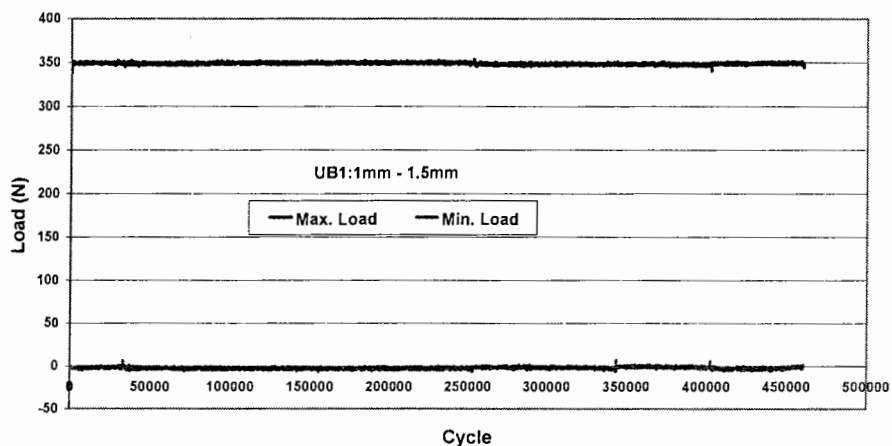
(الف)- نمودار بار- تعداد سیکل برای نمونه UA4 : 1/5 mm - 1/5 mm



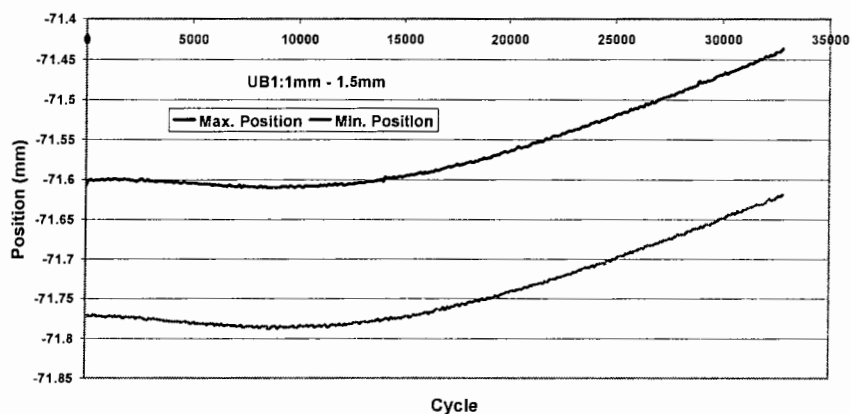
(ب) - نمودار جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UA4 : 1/5 mm - 1/5 mm

(شروع انتشار ترک تقریباً در 15000 سیکل)

شکل ۱۹- نمودار های بار- تعداد سیکل و جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UA4 : 1/5 mm - 1/5 mm

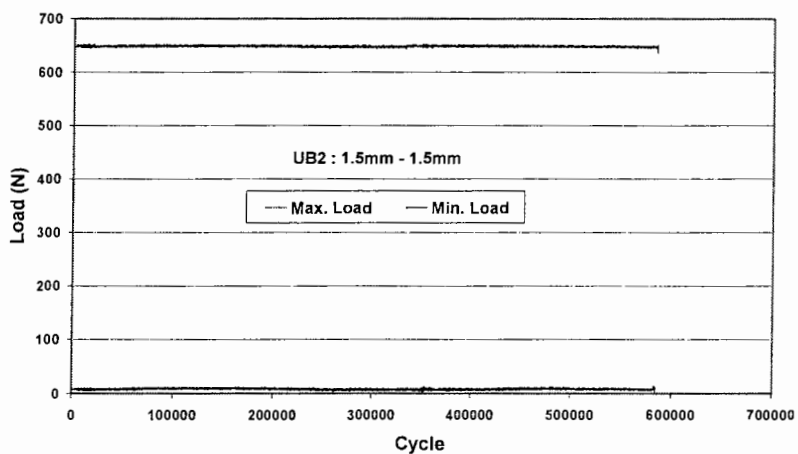


(الف) - نمودار بار - تعداد سیکل برای نمونه $UB1 : 1 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$

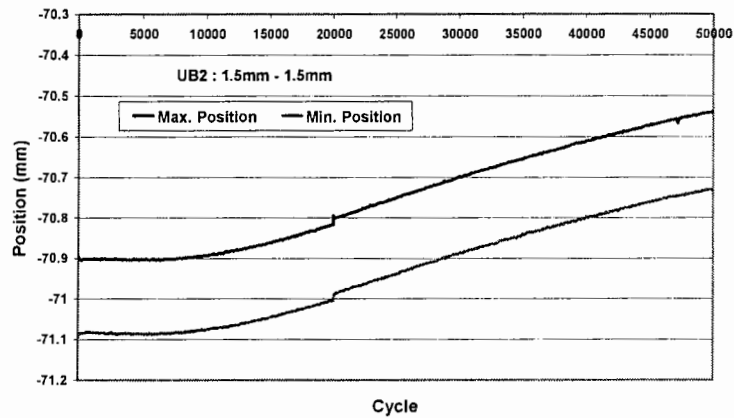


(ب) - نمودار جابجایی - تعداد سیکل برای نمونه $UB1 : 1 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$
(شروع انتشار ترک تقریباً در ۱۲۵۰۰ سیکل)

شکل ۲۰- نمودار های بار - تعداد سیکل و جابجایی - تعداد سیکل برای نمونه $UB1 : 1 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$

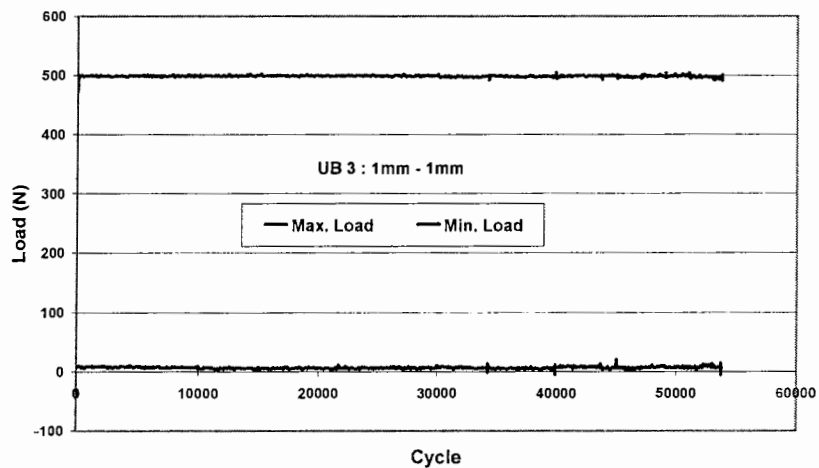


(الف) - نمودار بار - تعداد سیکل برای نمونه $UB2 : 1/5 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$

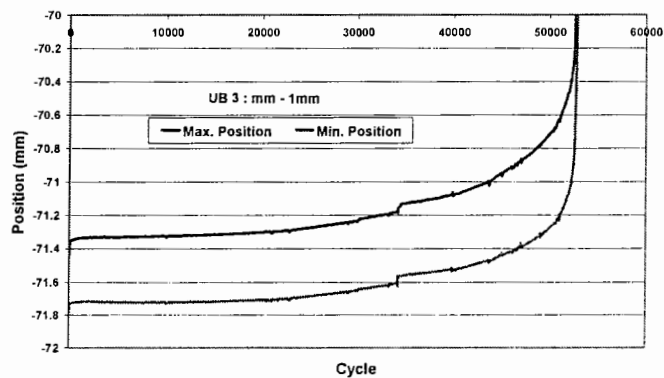


(ب) - نمودار جابجایی - تعداد سیکل برای نمونه UB2 : 1/5 mm - 1/5 mm
(شروع انتشار ترک تقریباً در ۸۰۰۰ سیکل)

شکل ۲۱- نمودار های بار- تعداد سیکل و جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UB2 : 1/5 mm - 1/5 mm

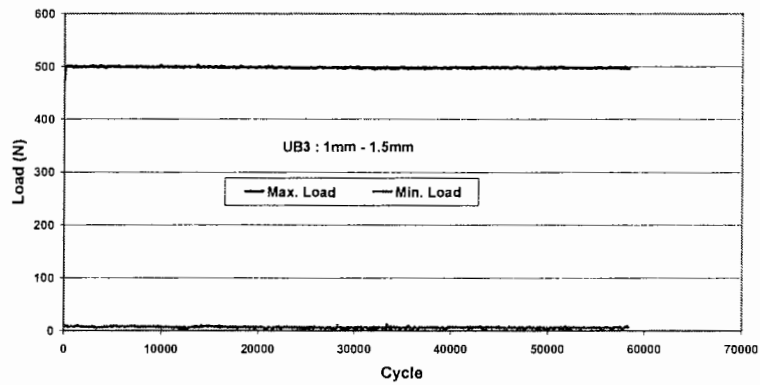


(الف) - نمودار بار- تعداد سیکل برای نمونه UB3 : 1 mm - 1 mm

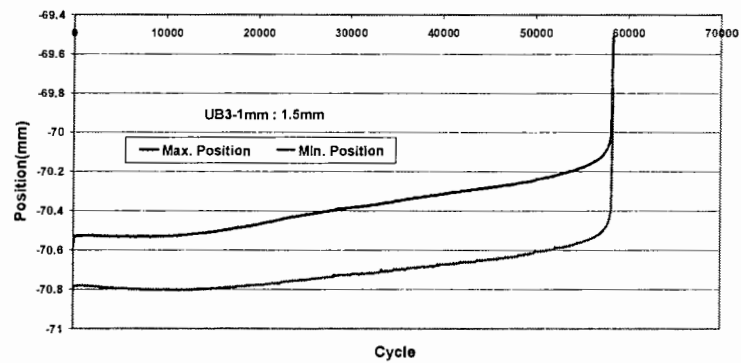


(ب) - نمودار جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UB3 : 1 mm - 1 mm
(شروع انتشار ترک تقریباً در ۱۲۰۰۰ سیکل)

شکل ۲۲- نمودار های بار- تعداد سیکل و جابجایی- تعداد سیکل برای نمونه UB3 : 1 mm - 1 mm

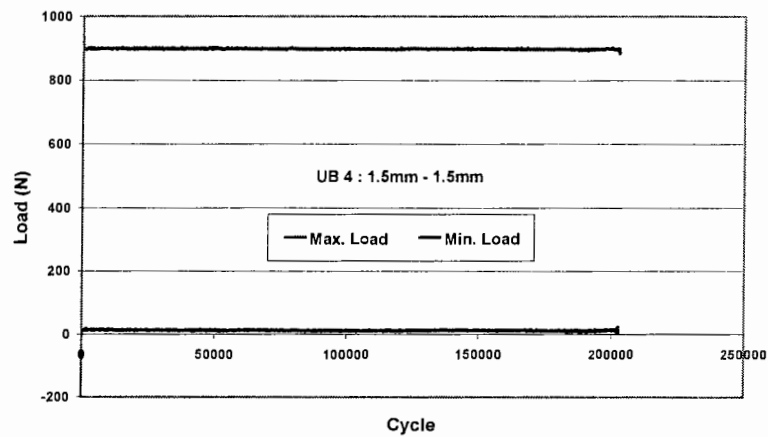


(الف) - نمودار بار - تعداد سیکل برای نمونه UB3 : 1 mm - 1/5 mm

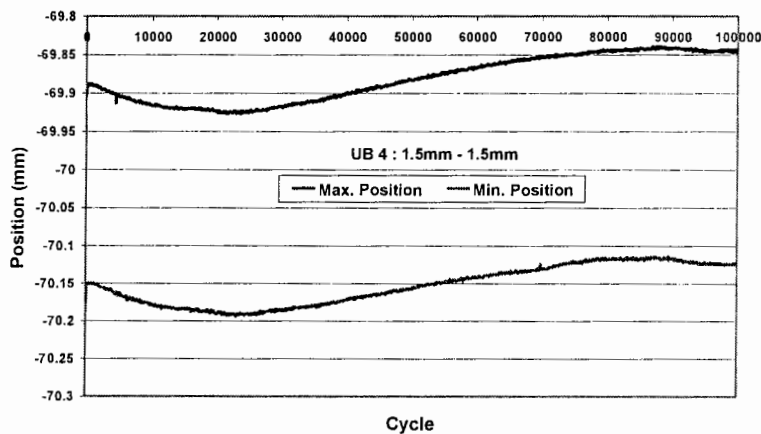


(ب) - نمودار جابجایی - تعداد سیکل برای نمونه UB3 : 1 mm - 1/5 mm
(شروع انتشار ترک تقریباً در ۱۲۰۰۰ سیکل)

شکل ۲۳ - نمودار های بار - تعداد سیکل و جابجایی - تعداد سیکل برای نمونه UB3 : 1 mm - 1/5 mm



(الف) - نمودار بار - تعداد سیکل برای نمونه UB4 : 1/5 mm - 1/5 mm



(ب) - نمودار جابجایی - تعداد سیکل برای نمونه $UB4 : 1/5 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$

(شروع انتشار ترک تقریباً در ۲۵۰۰۰ سیکل)

شکل ۲۴- نمودار های بار- تعداد سیکل و جابجایی - تعداد سیکل برای نمونه $UB4 : 1/5 \text{ mm} - 1/5 \text{ mm}$

۵-۶ بحث و بررسی نتایج

(۱) در جدول ۲ طول عمر ترک در مراحل جوانه زنی و رشد ترک در بین ضخامت ورقه مشاهده می شود (قابل رویت شدن ترک در سطح نمونه). با توجه به نتایج مشخص می شود که در نمونه های با طول عمر زیاد (بار اعمالی کم) مرحله جوانه زنی و رشد ترک بیشتر از نیمی از طول عمر نهایی را شامل می شود؛ این در حالی است که در نمونه های با طول عمر کم (بار اعمالی زیاد)، مراحل جوانه زنی و رشد ترک تا سطح، بطور میانگین در حدود ۴۰ درصد از عمر نهایی نمونه ها را تشکیل می دهد.

(۲) ترک ها بصورت کاملاً رشد یافته و ناگهانی به سطح خارجی می رسند، بطوریکه اندازه گیری ترک های ریز (کمتر از 2 mm) با استفاده از ابزار ممکن نمی باشد. بطور کلی ترک ها وقتی در سطح خارجی نمایان می شوند، طولی در حدود $2/5 - 4 \text{ mm}$ داشتند.

(۳) محل ترک ها در سطح خارجی، در دور دکه جوش و در سمت لبه عمودی می باشد.

(۴) ترک ها بصورت کماتی شکل حول دکه جوش رشد کرده و سپس به موازات لبه عمودی به رشد خود تا شکست کامل ادامه می دهند.

(۵) از جدول ۲ می توان به رابطه نوع شکست با درصد طول عمر پی برد. بطور کلی هر چه درصد طول عمر بیشتر باشد، شکست بصورت ناگهانی و از نوع شکست دکه جوش خواهد بود.

جدول ۲- طول عمر ترک در مرحله جوانه زنی و رشد تا قابل رویت شدن ترک در روی سطح

$\frac{N_p}{N_t} \times 100$	N_t ، عمر نهایی	N_p ، تعداد سیکلی که ترک در سطح نمونه مشاهده شد	حداکثر بار اعمالی (N)	نوع نمونه، U شکل	
۹۹	۱۳۳۵۲۵۵	۱۳۲۰۰۰۰	۲۰۰	۱mm- ۱mm	سری UA
۵۰	۴۵۸۴۶۳	۲۳۰۰۰	۳۵۰		
-	۱۱۶۳۳۵	-	۵۰۰		
۵۷	۱۷۵۵۷	۱۰۰۰۰	۶۵۰		
۹۳	۱۳۳۵۰۰۰	۱۲۴۰۰۰۰	۲۰۰	mm ۱/۵-۱	
۸۳	۳۳۳۱۸۲	۲۷۵۰۰۰	۳۵۰		
۳۳	۶۰۹۳۳	۲۰۰۰	۵۰۰		
۵۲	۱۳۵۴۹	۷۰۰۰	۶۵۰		
۴۵	۱۴۳۴۰۰۰	۶۵۰۰۰۰	۵۰۰	۱/۵ - ۱/۵	
۷۴	۳۴۲۸۸۱	۲۵۵۰۰۰	۶۵۰		
۳۲	۱۵۶۵۹۲	۵۰۰۰۰	۸۰۰		
۱۸	۱۱۳۴۳۵	۲۰۰۰۰	۹۰۰		
۸۲	۱۳۰۸۸۱۶	۱۰۷۵۳۶۴	۲۰۰	۱mm- ۱mm	سری UB
۶۸	۳۲۵۸۹۰	۲۲۰۰۰۰	۳۵۰		
۷۴	۵۳۷۶۶	۳۹۸۸۳	۵۰۰		
-	-	-	۶۵۰		
۶۹	۸۵۵۰۰۰	۱۲۳۸۹۰۰	۲۷۵	۱/۵ - ۱	
۲۸	۴۶۰۱۳۵	۱۳۰۰۰۰	۳۵۰		
۳۴	۵۸۳۳۸	۲۰۰۰۰	۵۰۰		
۴۴	۱۵۹۲۲	۷۰۰۰	۶۵۰		
۹۹	۱۱۹۹۳۴۶	۱۱۹۰۰۰۰	۵۰۰	۱/۵ - ۱/۵	
۹۱	۵۸۴۲۴۳	۵۳۰۰۰۰	۶۵۰		
۹۴	۲۴۰۴۱۱	۲۲۵۰۰۰	۸۰۰		
۵۹	۲۰۲۷۳۰	۱۲۰۰۰۰	۹۰۰		

۵-۶ نتیجه گیری

بطور کلی از بررسی و مشاهده سطوح و مقاطع شکست نتایج زیر حاصل می شود:

- (۱) در نمونه های با ضخامت متفاوت، ترک همواره در ورقه نازک شروع می شود. همچنین این ورق نازک است که در نهایت دچار شکست می گردد...
- (۲) در نمونه های با ضخامت یکسان، ترک در هر دو ورق با طولی تقریباً یکسان ایجاد می گردد.
- (۳) ترک بصورت کمّانی شکل در اطراف دکمه جوش رشد کرد، و شکست معمولاً در ورق اتفاق می افتد تا در نقطه جوش.
- (۴) عمر بعضی از نمونه ها کمتر از حد قابل انتظار بود. با بررسی های انجام شده دلیل این امر کم بودن قطر الکترود در هنگام جوشکاری برای آنها تشخیص داده شد، که باعث کیفیت نامطلوب جوش شده بود.
- (۵) با توجه به نمودار بار بر حسب طول عمر خستگی می توان به نکات زیر اشاره نمود:
الف) بیشترین دوام خستگی مربوط به نمونه های همسان با ضخامت ورقه ۱/۵ میلیمتر ($UA1.5mm:1.5mm$) (در بار ۵۰۰ نیوتن، تعداد سیکل نهایی ۱۴۳۴۰۰۰) و کمترین دوام خستگی مربوط به نمونه های همسان با ضخامت ورقه ۱ میلیمتر که دارای قطر دکمه جوش ۴ میلیمتر است (نمونه های $UB1mm:1mm$)، (در بار ۵۰۰ نیوتن، تعداد سیکل بارگذاری نهایی ۵۸۳۳۸) می باشد.
- ب) با توجه به نتایج تجربی مشخص می گردد که استفاده از جوشهای نقطه ای با ضخامت ناهمسان، تغییر چشمگیری در طول عمر خستگی آنها ایجاد نمی کند.