



بررسی تجربی و عددی رشد ترک خستگی در آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در حضور تنش‌های پسماند کششی

امیرمحمد زنگنه، ایرج ستاری فر*، محمد نوقابی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۴/۰۹

کلمات کلیدی:

رشد ترک خستگی

تنش پسماند

آلیاژ تیتانیوم

انتگرال J

خلاصه: رشد ترک خستگی از مکانیزم‌های شکست در سازه‌های مهندسی می‌باشد که با وجود حوزه‌ی تنش پسماند کششی تشدید می‌گردد. در این پژوهش، اثر تنش پسماند کششی در جلوی جبهه ترک بر روی رشد ترک خستگی مورد بررسی قرار گرفته‌است. تنش پسماند مکانیکی با استفاده از روش خمش چهار نقطه بر روی نمونه‌ها اعمال شده است و همچنین اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش کرنش سنجی سوراخ انجام گرفته است. آزمون رشد ترک خستگی بر روی نمونه‌های خمشی با ترک لبه دارای تنش پسماند و بدون تنش پسماند صورت پذیرفته و تکرارپذیری آزمایش بررسی شده است. به منظور بررسی ناحیه پلاستیک نوک ترک، تنش پسماند اعمالی و بدست آوردن پارامترهای مکانیک شکست از نرم‌افزار تجاری آباکوس استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها میزان افزایش نرخ رشد ترک خستگی در حضور تنش پسماند کششی را نشان می‌دهد. این افزایش نرخ رشد ترک خستگی تا ۵۰ درصد می‌تواند عمر خستگی را کاهش دهد.

۱- مقدمه

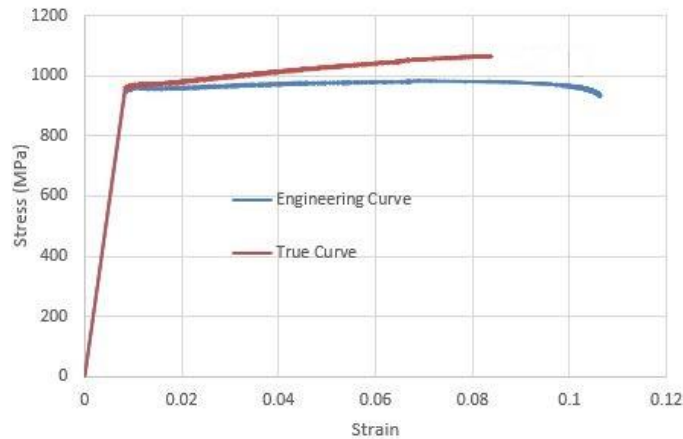
آلیاژهای تیتانیوم علاوه بر استحکام کششی و چقرمگی بالا (حتی در دماهای زیاد)، از مقاومت به خوردگی و خزش مناسبی نیز برخوردارند. ویژگی‌های فوق باعث کاربرد این آلیاژ در صنایع هوافضا، صنایع شیمیایی، برخی تجهیزات پزشکی، ایمپلنت‌ها و ساخت تجهیزات الکترونیکی شده است [۱]. با توجه به استفاده روزافزون آلیاژهای تیتانیوم در صنایع مختلف، لزوم تحقیقات بیشتر بر روی رفتار مکانیکی و دوام این آلیاژها تحت بارگذاری‌های مختلف وجود دارد.

خستگی، ضعیف شدن یک ماده ناشی از اعمال بارگذاری تکرارشونده می‌باشد. این آسیب، ساختاری پیشرونده و محلی دارد و زمانی رخ می‌دهد که یک ماده تحت بارگذاری نوسانی قرار گیرد. شکست خستگی بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن اتفاق می‌افتد، لذا تحلیل عمر خستگی سازه‌ها و عوامل موثر بر آن بسیار مهم است. خستگی علت شکست زود هنگام بسیاری از قطعه‌های صنعتی است [۲]. عمر خستگی یک ویژگی دینامیکی مهم سازه

می‌باشد که این ویژگی، تحت تأثیر تنش‌های پسماند در ناحیه نوک ترک می‌باشد. تخمین عمر خستگی سازه در حضور تنش‌های پسماند هنوز چالشی برای مهندسان طراح به شمار می‌آید. نتایج تحقیقات سایر محققان نشان داده است که تنش پسماند اثر قابل ملاحظه‌ای روی عمر خستگی سازه‌ها دارد [۳]. محققین زیادی اثرات تنش‌های پسماند روی عمر خستگی را بررسی کرده‌اند. "مک کلانگ" و همکاران [۴]، به بررسی مروری کارهای انجام شده در زمینه اثرات تنش پسماند و پایداری آن حین رشد ترک خستگی پرداختند. "وایدای" و همکاران [۵]، به بررسی المان محدود و تجربی رشد ترک در حوزه تنش‌های پسماند جوشی در دو حالت رشد ترک در راستای خط جوش و عمود بر خط جوش پرداختند. "مادوکس" و همکاران [۶] به بررسی استحکام خستگی سازه‌های جوشی حاوی تنش پسماند پرداختند. "ویترز" به بررسی مروری پژوهش‌های انجام شده در زمینه نقش تنش پسماند در خرابی سازه‌ها پرداخت [۷]. تنش پسماند کششی عمر خستگی را کاهش می‌دهد و تنش پسماند فشاری منجر به کاهش نرخ رشد ترک خستگی و در نتیجه افزایش عمر خستگی می‌شود [۸].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sattari@aut.ac.ir





شکل ۱. منحنی تنش - کرنش آلیاژ تیتانیوم گرید ۵.

Fig. 1. Stress-strain curve of grade 5 titanium alloy.

از انجام این تحقیق، بررسی رفتار رشد ترک خستگی در حضور تنش‌های پسماند مکانیکی می‌باشد. تنش پسماند به کمک روش خمش چهار نقطه‌ای در نمونه‌ها ایجاد شد و به کمک روش "کرنش سنجی سوراخ" اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی قرار گرفتند و رشد ترک خستگی در نمونه‌های دارای تنش پسماند با نمونه‌های بدون تنش پسماند با یکدیگر مقایسه شدند.

۲- تست‌های تجربی

در این بخش، کارهای تجربی صورت گرفته بیان می‌گردد.

۲-۱- تست کشش

در ابتدا تست کشش تک محوره جهت بدست آوردن خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ صورت گرفت. با توجه به اینکه در تحلیل المان محدود نیاز است که داده‌های تنش کرنش حقیقی وارد شود، بایستی داده‌های حاصل از تست کشش را به نمودار تنش - کرنش حقیقی تبدیل نمود. تبدیل تنش - کرنش مهندسی به تنش کرنش حقیقی به کمک معادلات (۱) و (۲) انجام می‌گیرد. نتایج در شکل (۱) آورده شده است.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \epsilon_{eng}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (2)$$

با گسترش روز افزون استفاده از آلیاژهای تیتانیوم در صنایع مختلف نظیر هوافضا، که قطعات تحت بارگذاری تکرارشونده می‌باشند، تحقیقات زیادی روی عمر خستگی قطعات ساخته شده از آلیاژهای تیتانیوم صورت گرفته است. "نتو" و همکاران [۹] به بررسی عددی و تجربی رشد ترک خستگی در نمونه‌های آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V تحت بارگذاری "فرابار" پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مکانیزم "بسته شدن ترک" ناشی از فرابار اثر قابل ملاحظه‌ای روی رشد ترک خستگی دارد. "لو" و همکاران [۱۰] اثر "ساجمه زنی" و "لیزرکوبی" را بر روی ریزساختار و خواص خستگی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بطور تجربی بررسی کردند. آن‌ها پارامترهای مختلفی همچون مورفولوژی سطح، زبری سطح، تنش‌های پسماند فشاری و ریزساختار را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تنش پسماند ناشی از فرایند ساجمه‌زنی عمر خستگی را بهبود می‌بخشد. "ژانگ" و همکاران [۱۱] به بررسی تجربی و عددی رشد ترک خستگی در آلیاژهای تیتانیوم در حضور تنش‌های پسماند ناشی از فرایند "لیزرکوبی" پرداختند. آن‌ها به کمک روش "تفرق پرتو ایکس" تنش پسماند را قبل و بعد رشد خستگی در نمونه‌ها اندازه‌گیری کردند. آن‌ها از اصل "برهم نهی" و استفاده از روش تابع وزنی برای پیش‌بینی نرخ رشد ترک خستگی در مدل المان محدود استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که تنش‌های پسماند فشاری عمر خستگی را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد.

با اینکه در دهه اخیر تحقیقات زیادی روی رشد ترک خستگی در آلیاژهای تیتانیوم صورت گرفته است، ولی اثرات ناشی از تنش‌های پسماند مکانیکی روی عمر خستگی این آلیاژها نیاز به تحقیقات بیشتر دارد. هدف

جدول ۱. مشخصات مکانیکی آلیاژ تیتانیوم گرید ۵.

Table 1. Mechanical specifications of grade 5 titanium alloy.

تنش نهایی	تنش تسلیم (0.2%)	مدول الاستیک
۱۰۱۰ مگاپاسکال	۹۵۰ مگاپاسکال	۱۱۳/۸ گیگاپاسکال



شکل ۲. تنظیمات انجام شده برای انجام تست خمش چهار نقطه.

Fig. 2. Four-point bending test settings.

ساخته شد.

۲-۳- اندازه‌گیری تنش پسماند به روش کرنش‌سنجی سوراخ

پس از ایجاد تنش پسماند، نیاز است که مقادیر آن به صورت تجربی اندازه‌گیری شود. در این تحقیق، از روش کرنش‌سنجی سوراخ برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند استفاده گردید. روش کرنش‌سنجی سوراخ یکی از روش‌های شناخته شده برای اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند می‌باشد. در شکل (۳) نحوه چسبیدن گلبرگ به قطر ۵/۱۳ میلی متر و دقت سطح ۰/۰۲ میلی متر جهت اندازه‌گیری کرنش بر روی نمونه مشاهده می‌شود.

۳- مدلسازی المان محدود

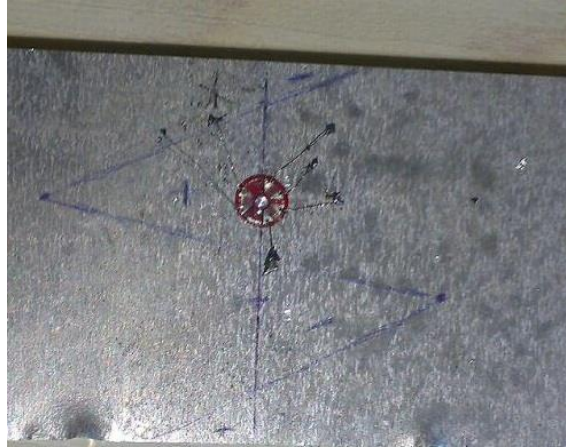
در این بخش، نحوه مدل‌سازی تنش پسماند مکانیکی و همچنین رشد

خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ که از داده‌های حاصل از تست کشش تک محوره می‌باشد، در جدول (۱) آورده شده است. این داده‌ها نتایج حاصل از میانگین گرفتن برای ۳ نمونه تست کشش می‌باشد.

۲-۲- ایجاد تنش پسماند مکانیکی

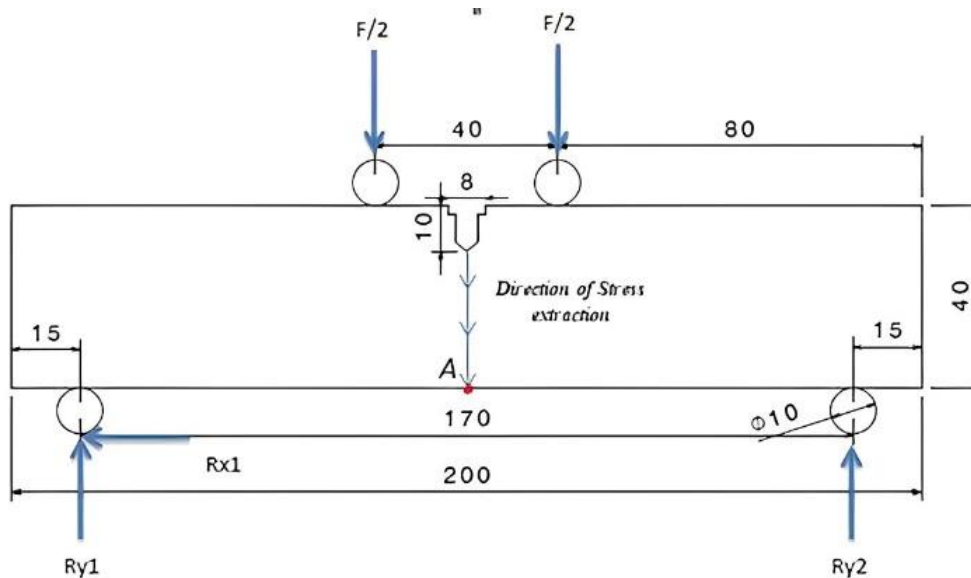
برای ایجاد تنش پسماند مکانیکی از روش خمش چهار نقطه‌ای استفاده می‌گردد. این روش، از مرسوم‌ترین روش‌های ایجاد تنش پسماند مکانیکی می‌باشد [۱۲]. تصویر این روش در شکل (۲) نشان داده شده است.

در استاندارد ISO 12108 [۱۳] ابعاد و ویژگی‌های نمونه خمش چهار نقطه‌ای آمده است. طبق استاندارد برای جلوگیری از اثر تنش برشی ناشی از خمش و همچنین جلوگیری از چرخش ناشی از بارگذاری، طول اسپن بزرگ (فاصله دو تکیه‌گاه) حداقل ۲ برابر طول اسپن کوچک باشد. همچنین طول اسپن کوچک باید حداقل ۲ برابر پهناي نمونه باشد. نمونه‌ها مطابق استاندارد



شکل ۳. گلبرگ چسبانده شده بر روی بلوک آلیاژ تیتانیوم گرید ۵.

Fig. 3. Strain gauge rosette attached on grade 5 titanium alloy plate.



شکل ۴. هندسه و شرایط مرزی اعمال شده به مدل المان محدود.

Fig. 4. Geometry and boundary conditions applied to the finite element model.

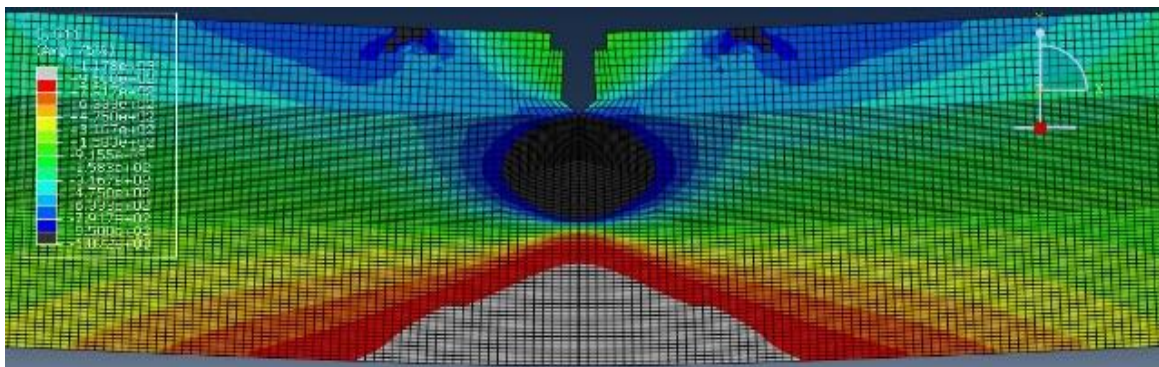
ترک خستگی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس بیان می‌گردد.

۳-۱- ایجاد تنش پسماند مکانیکی

ورق آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ با ابعاد $200 \times 40 \times 10$ میلی‌متر به صورت سه بعدی مدل شده است. همچنین شیار به عمق ۱۰ میلی‌متر در مرکز قطعه قرار دارد. شرایط مرزی اعمال شده به مدل المان محدود به این صورت است که بلوک تیتانیوم بین چهار میله قرار گرفته است. دو میله در بالا (به قطر

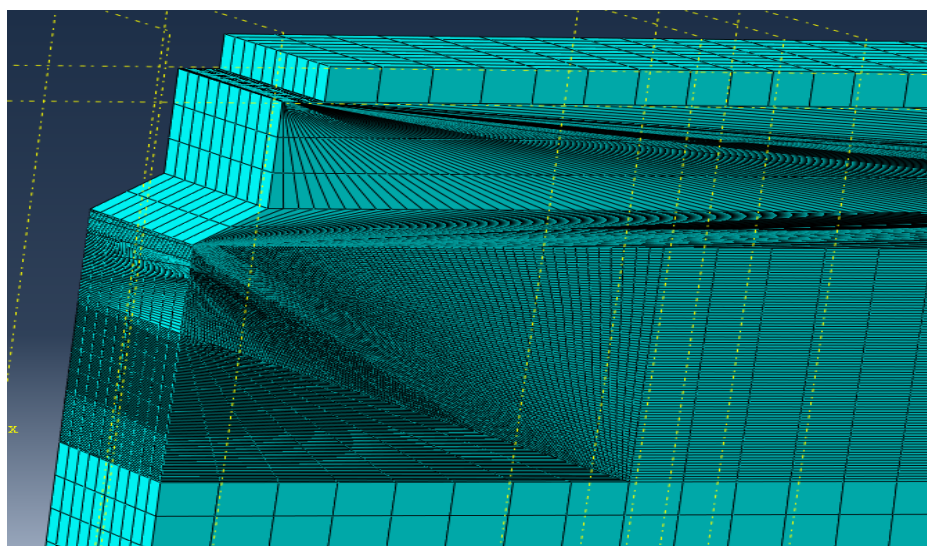
۱۰ میلی‌متر) به عنوان عامل وارد کردن نیرو و دو میله در پایین (به قطر ۱۰ میلی‌متر) به عنوان تکیه‌گاه در نظر گرفته شده است. فاصله میله‌ها از یکدیگر در شکل (۴) مشخص می‌باشد.

به دلیل فرورفتگی میله‌های فک‌های خمش در بلوک تیتانیومی و عدم لغزش بلوک بر روی میله‌های استوانه‌ای، شرایط مرزی بین میله‌ها و بلوک تیتانیومی بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. از المان‌های مکعبی ۸ گره‌ای با ابعاد 0.0625 میلیمتر جهت مش‌بندی در نوک ترک استفاده گردید.



شکل ۵. به تسلیم رسیدن مناطق مشخص شده به رنگ خاکستری در مدل المان محدود.

Fig. 5. The gray coloured areas in the finite element model are reached to yield.



شکل ۶. نمایی از مش بندی در ناحیه نوک ترک.

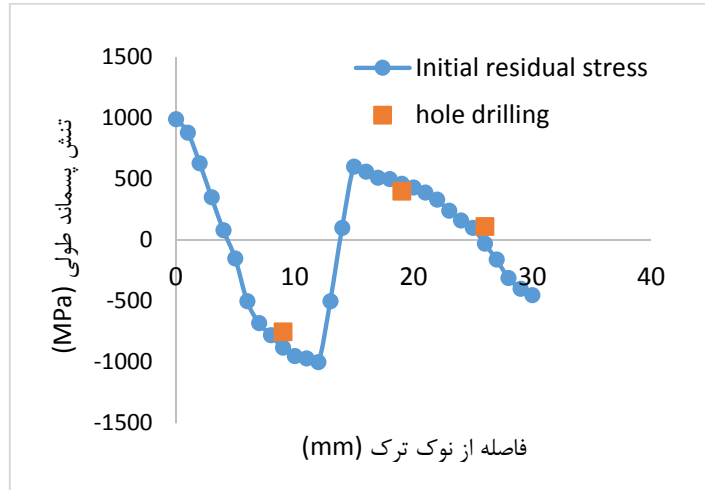
Fig. 6. A view of meshing in the crack tip area.

مرحله دوم با حفظ شرایط مرزی بارگذاری، بار از روی قطعه کار برداشته شده و تنش پسماند در قطعه باقی می ماند. شکل (۵) توزیع تنش در راستای طول نمونه بعد از بارگذاری را نشان می دهد. مناطقی که با رنگ مشکی مشخص شده است وارد منطقه پلاستیک شده است. در شکل (۶) نمایی از مش بندی در ناحیه نوک ترک مشاهده می گردد. مش ها با نزدیک شدن به نوک ترک در چند مرحله ریزتر شدند.

در شکل (۷) نمودار تنش پسماند طولی در نمونه به روش المان محدود که با روش کرنش سنجی سوراخ صحنه سنجی شده است، نشان داده شده است. اندازه گیری تنش پسماند در ۶ نقطه انجام شده (۳ نقطه روی نمونه

ابعاد المان ها با توجه به آنالیز حساسیت مش انتخاب گردید. ابعاد المان در نوک ترک کوچکتر از ابعاد المان در سایر قسمت ها می باشد. نمونه از حدود ۲۵۰ هزار المان تشکیل شده است. در پژوهش حاضر بعد از خریداری آلیاژ تیتانیوم، این آلیاژ تنش گیری شده و به همین دلیل در تحلیل المان محدود از اثر باوشینگر صرف نظر شده است. بنابراین رفتار ماده در منطقه پلاستیک نمودار تنش - کرنش سخت شونده همسانگرد در نظر گرفته شده و از سخت شونده سینماتیکی صرف نظر شده است.

مقدار نیروی در نظر گرفته شده جهت ایجاد تنش پسماند ۸۰۰۰۰ نیوتن می باشد. در این تحلیل ابتدا نیرو توسط پین ها به قطعه اعمال می شود و در



شکل ۷. تنش پسماند طولی در راستای خط تقارن قطعه.

Fig. 7. Longitudinal residual stress along the symmetry line of the specimen

ISO12108 ضخامت نمونه باید بین $0.7W \leq B \leq W$ پهنای نمونه باشد. با توجه به اینکه ضخامت نمونه ۱۰ میلی‌متر بود، این شرط برقرار است. همچنین باید قطر غلتکها بزرگتر از $\frac{W}{8} \leq d$ باشد که این شرط نیز برقرار است. برای اطمینان از تسلیم شدن کل مقطع، رابطه زیر برای قسمت غیر شیاردار بایستی برقرار باشد.

$$W - a = \frac{12WF_{\max}}{2BR_{p0.2}} \quad (3)$$

که در رابطه فوق، W پهنای نمونه، B ضخامت قطعه، a طول شیار و $R_{p0.2}$ تنش تسلیم جنس نمونه می‌باشد. بازه‌های اندازه‌گیری رشد ترک طبق استاندارد باید $0.7W \leq \Delta a$ باشد. لذا بازه اندازه‌گیری باید کوچکتر از ۱/۶ میلی‌متر باشد. در این تحقیق بازه اندازه‌گیری طول ترک ۰/۵ میلی‌متر بود. شرایط مرزی اعمال شده به مدل المان محدود به این صورت است که بلوک تیتانیوم بین ۳ غلتک قرار گرفته است. یک میله (به قطر ۲۵ میلی‌متر) به عنوان عامل وارد کردن نیرو و دو میله (به قطر ۲۵ میلی‌متر) به عنوان تکیه‌گاه در نظر گرفته شده است.

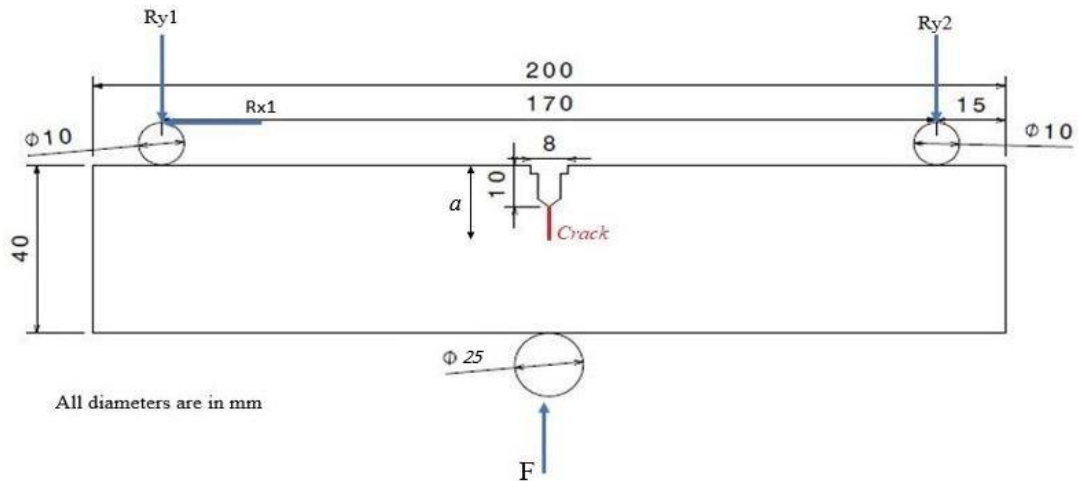
شرایط مرزی به میله‌ها اعمال شده و بین میله‌ها و بلوک تیتانیومی بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. به دلیل فرورفتگی میله‌های فک‌های خمش در بلوک تیتانیومی و عدم لغزش بلوک بر روی میله‌های استوانه‌ای رابطه این دو جسم بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. در این شبیه

و ۳ نقطه پشت نمونه در فواصل یکسان) و سپس میانگین گرفته شده است. لازم به ذکر است که تنش پسماند اولیه حین بارگذاری سیکلی دچار رهایی^۱ می‌شود و توزیع مجدد^۲ می‌یابد. محققین زیادی به بررسی اثر رهایی تنش پسماند و توزیع مجدد آن بر عمر خستگی پرداخته‌اند. "نوقابی" و همکاران توزیع مجدد تنش پسماند مکانیکی بر اثر رشد ترک خستگی را بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که تنش پسماند اولیه پس از چند سیکل بارگذاری خستگی، توزیع مجدد می‌یابد که نحوه توزیع مجدد آن وابسته به سطح تنش پسماند اولیه و دامنه بارگذاری سیکلی می‌باشد [۱۴]. در این تحقیق، رهایی تنش پسماند اولیه در مدل‌های المان محدود لحاظ شده است.

۳-۲- رشد ترک خستگی

شبیه‌سازی رشد ترک خستگی برای بارگذاری خمش سه نقطه‌ای توسط نرم‌افزار المان محدود در دو نمونه که یکی دارای تنش پسماند مکانیکی ناشی از خمش ۴ نقطه (توضیح داده شده در بخش ۳-۱) و دیگری بدون حضور تنش پسماند انجام می‌شود. در شکل (۸) هندسه و شرایط مرزی اعمال شده به مدل المان محدود که مشابه تست‌های تجربی رشد ترک خستگی بوده است، مشاهده می‌گردد. ابعاد نمونه و همچنین فیکسچر بارگذاری مطابق با استاندارد ISO12108 ساخته شد. که طبق استاندارد

- 1 Relaxation
- 2 Redistribute



شکل ۸. هندسه و شرایط مرزی اعمال شده به مدل المان محدود (خمش سه نقطه) در شبیه سازی رشد ترک خستگی.

Fig. 8. Geometry and boundary conditions applied to the finite element model (three-point bending) in fatigue crack growth simulation.

انتگرال غیروابسته به مسیر را ارائه کرد که در مسایل ترک تحت تنش های اولیه و ثانویه شامل تنش های حرارتی، تنش های پسماند و یا ترکیب آن ها قابل استفاده می باشد.

"لی" یک مقدار متوسط تنش پسماند را به صورت توزیع تنش ورودی در یک جسم بدون ترک اعمال کرد و حوزه کرنشی مطلوب ϵ_{ij}^0 را پس از جدا کردن کرنش های الاستیک به دست آورد. با وجود کرنش های اولیه، کرنش ϵ_{ij} به دو کرنش ناشی از بارگذاری مکانیکی ϵ_{ij}^m و کرنش اولیه ϵ_{ij}^0 تقسیم می گردد.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^m + \epsilon_{ij}^0 \quad (5)$$

کرنش های اولیه فقط به کرنش های پلاستیک در حالت اولیه $\epsilon_{ij}^e|_{initial}$ بستگی دارند نه کرنش الاستیک ϵ_{ij}^0 و نظیر آن.

$$\epsilon_{ij}^0 = \epsilon_{ij}^e|_{initial} \quad (6)$$

این مسئله به این دلیل است که کرنش های الاستیک اولیه برگشت پذیر هستند و این امر آن ها را به عنوان بخشی از کرنش مکانیکی نشان می دهد. یک مورد مهم دیگر که باید در هنگام محاسبه انتگرال J در مواردی

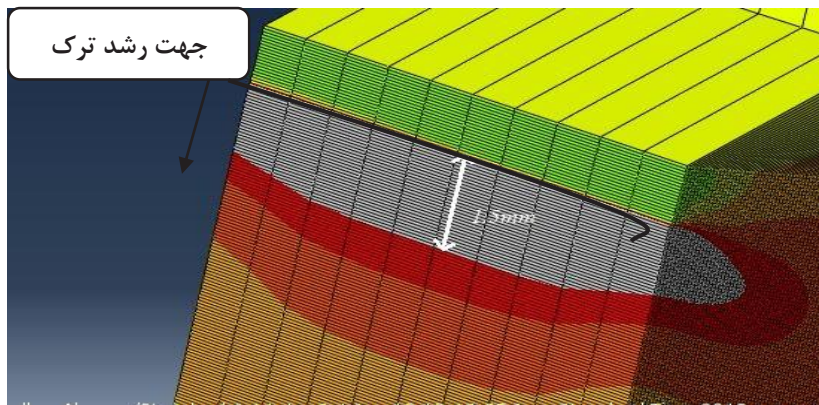
سازی، رشد ترک خستگی از ۱/۵ تا ۶ میلی متر در نوک شیار در نظر گرفته شده است.

۴- بحث روی نتایج

چنانچه بارگذاری به گونه ای باشد که در ناحیه نوک ترک منطقه پلاستیک بزرگی ایجاد شود، مکانیک شکست الاستوپلاستیک می تواند درک بهتری از نحوه رشد ترک ارائه نماید. یکی از مهم ترین و پرکاربردترین پارامترها در این حوزه انتگرال J می باشد. مفهوم انتگرال J اولین بار توسط رایس [۱۵] ارائه شد. این انتگرال مستقل از مسیر بوده و به صورت رابطه ۴ تعریف می شود.

$$J = \int_{\Gamma} (Wn_1 - T_m \frac{\partial u_m}{\partial x_1}) ds \quad (4)$$

در این رابطه، W چگالی انرژی کرنشی، n_1 مؤلفه x_1 نرمال واحد بر کانتور Γ ، $T_m = \sigma_{mk} n_k$ نیروی وارده و u_m مؤلفه جابجایی است. پس از رایس، محققین دیگری از مفهوم انتگرال J برای بیان معیار رشد ترک استفاده نمودند [۱۶، ۱۷]. این مفهوم گسترش یافت و پژوهشگران دیگری نیز از آن برای تحلیل رشد ترک خستگی استفاده نمودند [۱۸-۲۰]. تنش پسماند سبب می شود تا این انتگرال، استقلال از مسیر خود را از دست داده و مقدار دقیقی به دست ندهد. لذا بایستی آن را اصلاح نمود. "لی" یک



شکل ۹. شعاع منطقه پلاستیک جبهه ترک.

Fig. 9. The radius of the plastic zone at the crack tip.

می‌باشند. تنش تسلیم ۹۵۰ مگاپاسکال می‌باشد و مقدار K_I را می‌توان از تبدیل انتگرال J که از نرم‌افزار المان محدود آباکوس بدست می‌آید، محاسبه نمود و با جایگذاری در رابطه ۸ مقدار r_y برابر ۲/۲۱ میلی‌متر محاسبه می‌گردد. در شکل ۹ شعاع منطقه پلاستیک در نوک ترک مشاهده می‌گردد و چون کوچکتر از ۲/۲۱ میلی‌متر است، می‌توان گفت که پارامتر K می‌تواند به عنوان پارامتر حاکم در جبهه ترک معتبر باشد.

طبق رابطه (۱۰) می‌توان مقدار K_I را محاسبه نمود.

$$J = \frac{K_I^2}{E'} \quad (10)$$

با استفاده از رابطه ۹ می‌توان مقدار K_I را در جبهه ترک برای ترک‌های ۱/۵ تا ۶ میلی‌متری محاسبه نمود. بارگذاری خستگی با نیروی ۲۰۰۰ نیوتن و نسبت تنش $R=0.1$ و با فرکانس ۱۰ هر تتر صورت گرفت. در این شبیه‌سازی جبهه هر ترک از ۱۰ المان (عمود بر صفحه ترک در جهت ضخامت قطعه) تشکیل شده است که مقدار انتگرال J را می‌توان برای هر یک از این المان‌ها محاسبه نمود. در شکل (۱۰) می‌توان مقدار بیشینه انتگرال J در جبهه ترک‌های ۱/۵ تا ۶ میلی‌متری حین رشد ترک خستگی در نمونه بدون تنش پسماند را مشاهده کرد.

مقادیر انتگرال J در شبیه سازی رشد ترک خستگی در حضور تنش پسماند مکانیکی برای جبهه ترک ۱/۵ تا ۶ میلی‌متری را می‌توان در نمودار شکل (۱۱) مشاهده نمود.

که دارای تنش پسماند هستند در نظر گرفته شود، چگالی انرژی کرنشی W می‌باشد که باید فقط به کرنش‌های مکانیکی و نه کرنش‌های اولیه وابسته باشد. چگالی انرژی کرنشی مکانیکی با استفاده از رابطه زیر اصلاح شد.

$$W^m = W - W^p |_{initial} \quad (7)$$

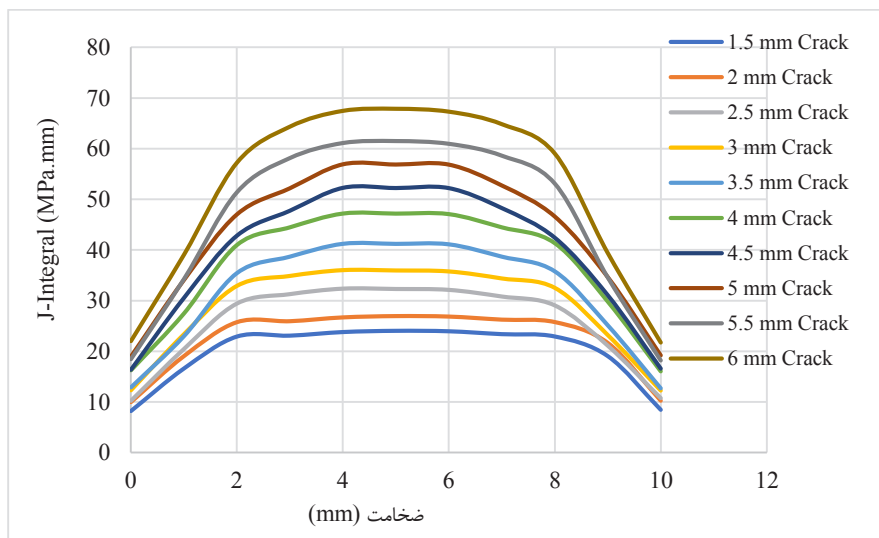
که در اینجا W^m چگالی انرژی کرنشی مکانیکی، W چگالی انرژی کرنشی کل و $W^p |_{initial}$ چگالی انرژی کرنشی پلاستیک اولیه می‌باشد. رابطه زیر اثرات تنش پسماند را در معادله انتگرال J لحاظ می‌کند [۲۱].

$$J = \int_A \left[\left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - W^m \delta_{ii} \right) \frac{\partial q_1}{\partial x_i} + \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}^0}{\partial x_i} q_1 \right] dA \quad (8)$$

شرط اصلی به منظور تبدیل انتگرال J به K_I کوچک بودن منطقه پلاستیک نوک ترک می‌باشد. ابروین رابطه (۹) را به منظور محاسبه تخمینی منطقه پلاستیک در جبهه ترک پیشنهاد داده است.

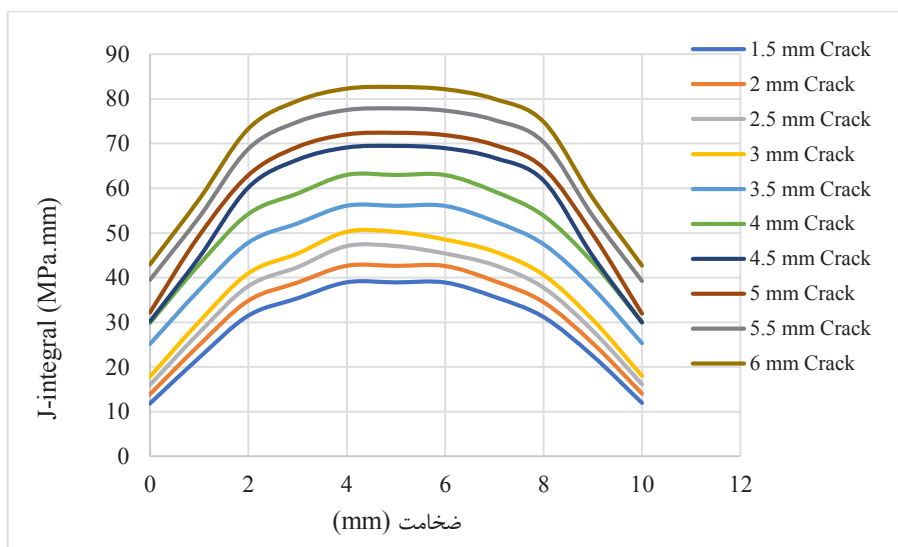
$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (9)$$

که در این رابطه K_I ضریب شدت تنش و σ_y تنش تسلیم ماده



شکل ۱۰. مقادیر انتگرال J در جبهه ترک ۱/۵ تا ۶ میلی‌متری بدون حضور تنش پسماند.

Fig. 10. The J-Integral values in the 1.5 to 6 mm crack without residual stress.



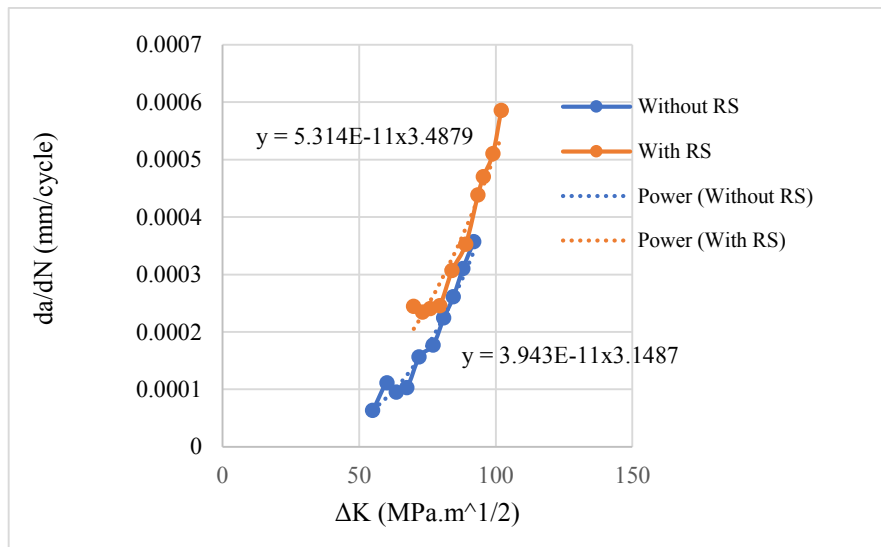
شکل ۱۱. مقادیر انتگرال J در جبهه ترک ۱/۵ تا ۶ میلی‌متری دارای تنش پسماند.

Fig. 11. The J-Integral values in the 1.5 to 6 mm crack in the presence of residual stress.



شکل ۱۲. نمودار تجربی رشد طول ترک بر حسب تعداد سیکل برای ۲ نمونه با تنش پسماند و ۲ نمونه بدون تنش پسماند.

Fig. 12. Experimental diagram of crack growth according to the number of cycles for 2 samples with residual stress and 2 samples without residual stress.



شکل ۱۳. نمودار تجربی نرخ رشد ترک برای نمونه دارای تنش پسماند و بدون تنش پسماند

Fig. 13. Experimental graph of crack growth rate for samples with residual stress and without residual stress

شدت تنش مشاهده می‌شود. با استفاده از برازش منحنی روی داده‌های نمودار شکل (۱۳)، ضرایب مربوط به جنس ماده در رابطه قانون رشد ترک پاریس به دست می‌آید.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (11)$$

نمودار تجربی رشد طول ترک بر حسب تعداد سیکل بارگذاری خستگی برای نمونه‌های دارای تنش پسماند مکانیکی و بدون تنش پسماند در شکل (۱۲) آورده شده است. اندازه گیری رشد ترک به کمک روش چشمی و به کمک یک خط کش مدرج با دقت ۰/۵ میلی‌متر انجام گردید.

در شکل (۱۳) نمودار تجربی نرخ رشد ترک خستگی برحسب بازه ضریب

جدول ۲. مقادیر محاسبه شده C و m

Table 2. Calculated values of C and m parameters.

مطالعه حاضر (با تنش پسماند)	مطالعه حاضر (بدون تنش پسماند)	پارامتر
5.31×10^{-11}	3.94×10^{-11}	C
۳/۴۹	۳/۱۵	m

- [2] N. Benachour, M. Benachour, A. Hadjoui, B. Mohamed, Effect of the amplitude loading on fatigue crack growth, *Procedia Engineering*, 2 (2010) 121-127.
- [3] R. Bucci, Effect of residual stress on fatigue crack growth rate measurement, in, *ASTM International*, 1981, pp. 28-47.
- [4] R.C. McClung, A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 30(3) (2007) 173-205.
- [5] W.V. Vaidya, P. Staron, M. Horstmann, Fatigue crack propagation into the residual stress field along and perpendicular to laser beam butt-weld in aluminium alloy AA6056, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 35(5) (2012) 399-411.
- [6] S.J. Maddox, *Fatigue Strength of Welded Structures*, Woodhead Publishing, Limited, 2000.
- [7] P.J. Withers, Residual stress and its role in failure, *Reports on Progress in Physics*, 70(12) (2007) 2211.
- [8] Z. Barsoum, I. Barsoum, Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM, *Engineering failure analysis*, 16(1) (2009) 449-467.
- [9] D. Neto, M. Borges, F. Antunes, J. Jesus, Mechanisms of fatigue crack growth in Ti-6Al-4V alloy subjected to single overloads, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 114 (2021) 103024.
- [10] X. Luo, N. Dang, X. Wang, The effect of laser shock peening, shot peening and their combination on the microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy, *International Journal of Fatigue*, 153

ضرایب مربوط به جنس که در جدول (۲) آورده شده است از اهمیت بالایی برخوردارند. به کمک این ضرایب که وابسته به جنس هستند، می‌توان عمر خستگی را در بارگذاری‌ها و هندسه‌های مختلف تخمین زد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به مطالعه اثر تنش‌های پسماند بر روی رشد ترک خستگی آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ پرداخته شد. تنش پسماند مکانیکی توسط روش خمش چهار نقطه‌ای ایجاد شد. توزیع این تنش پسماند به کمک روش کرنش سنجی سوراخ صحنه‌سنجی شد. شبیه‌سازی تنش پسماند و رشد ترک خستگی توسط نرم افزار المان محدود آباکوس انجام گرفت. نتایج این تحقیق به قرار زیر است.

- ۱- تنش‌های پسماند تاثیر قابل توجهی بر روی عمر خستگی و مشخصات شکست نمونه‌ها دارد.
- ۲- تنش پسماند کششی سبب افزایش نرخ رشد ترک خستگی می‌شود که این عمر منجر به کاهش عمر خستگی می‌گردد. تنش‌های پسماند کششی تا ۵۰ درصد عمر خستگی را کاهش می‌دهند.
- ۳- انتگرال J پارامتر مناسبی جهت بررسی رشد ترک خستگی در حضور تنش‌های پسماند می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه فضایی ایران که حمایت مالی این پژوهش را برعهده داشته است، قدردانی می‌گردد.

منابع

- [1] G. Lütjering, J.C. Williams, *Titanium*, Springer Berlin Heidelberg, 2013.

- [16] J.A. Begley, J.D. Landes, The J integral as a fracture criterion, in, ASTM Standard, 1972.
- [17] K.B. Broberg, Crack-growth criteria and non-linear fracture mechanics, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 19(6) (1971) 407-418.
- [18] C.L. Chow, T.J. Lu, On the cyclic J-integral applied to fatigue cracking, International Journal of Fracture, 40(3) (1989) 53-59.
- [19] N. Dowling, J.A. Begley, Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and the J-Integral, ASTM special technical publications, (1976) 82-103.
- [20] M. Noghabi, I. Sattarifar, H. Hosseini Toudeshky, Estimation of Fatigue Life in Al alloy Specimens Using FEA, Mechanic of Advanced and Smart Materials, 1(1) (2021) 56-71. (in Persian).
- [21] Y. Lei, N. O'dowd, G. Webster, Fracture mechanics analysis of a crack in a residual stress field, International Journal of Fracture, 106(3) (2000) 195-216.
- (2021) 106465.
- [11] H. Zhang, Z. Cai, J. Chi, R. Sun, Z. Che, H. Zhang, W. Guo, Fatigue crack growth in residual stress fields of laser shock peened Ti6Al4V titanium alloy, Journal of Alloys and Compounds, 887 (2021) 161427.
- [12] A.M. Sisan, The influence of prior thermal and mechanical loading on fracture, University of Bristol, 2005.
- [13] ISO12108. International Standard – Metallic material – Fatigue Testing – Fatigue crack growth method, in, ISO, Geneva, Switzerland 2018.
- [14] M. Noghabi, I. Sattari-far, H.H. Toudeshky, The study of redistribution in residual stresses during fatigue crack growth, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 15(4) (2021) 8565 - 8579.
- [15] J. Rice, A Path Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, Journal of Applied Mechanics, 35 (1968) 379-386.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Zangeneh, I. Sattarifar, M. Noghabi, A Numerical and Experimental Study on Fatigue Crack Growth of Ti-6Al-4V Specimens in Presence of Tensile Residual Stresses, Amirkabir J. Mech Eng., 55(4) (2023) 543-554.

DOI: 10.22060/mej.2023.22012.7556

