



Study of Autofrettage Process Effect in Thick-walled Cylinder with Metal Matrix Composite by the method of Finite Element Cyclic Stress Analysis

H. Sayar¹, R. Molahamzadeh², M. H. Korani², M. Azadi^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

²Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT: The goal of this study is to analyze the interplay of mechanical and thermal properties and the applied thermomechanical cyclic load combined with the fatigue crack numerical simulation of a thick cylinder. The applied boundary conditions are similar to the working gun barrel during continuous firing. Four stress conditions in 25-950°C and 100-400 MPa pressure has been investigated. Conditions include first, without autofrettage and cracking; second, with autofrettage and without cracking; third, without autofrettage and with cracking; and fourth with autofrettage and with cracking has been investigated. A comparison of the results obtained from simulated models of the autofrettaged and non-autofrettaged barrels has information about the evolution of strains and stresses in the barrel at different points under thermo-mechanical loading cycles in both cases. The materials in the barrel were ST50 steel and SiC/Ti-24Al-11Nb metal matrix composite in three different diameter ratios. The results showed that autofrettage softened the inner surface of the barrel. This phenomenon was seen as a decrease in the hardness of the inner surface of the barrel. The maximum stress of thermomechanical cyclic loading there was until 9 mm of depth. This depth is the active length of crack propagation.

Review History:

Received: Jan. 11, 2022

Revised: Jun. 05, 2022

Accepted: Jul. 03, 2022

Available Online: Jul. 27, 2022

Keywords:

Thick-walled cylinder

Autofrettage

Metal-matrix composite

Numerical simulation

Crack

1- Introduction

Thick-walled cylinders are one of the most used parts in the industry. These cylinders are widely used in various industries. In order to save on materials and reduce production costs, many researchers and engineers intend to prioritize the optimal use of materials. One of the best methods in the production of thick-walled cylinders is a design based on elastic-plastic methods.

2- Methodology

For autofrettage modeling, the temperature is 25°C, and the internal pressure of 515, 525, and 535 MPa is applied according to the ratio of the inner and outer diameters of the barrel with ST52 steel. This causes hoop stress as large as the values mentioned on the inner surface of the barrel. At the end of this stage, the internal hoop stresses are spread on the surface and to a certain depth in the cylinder, and then the thermomechanical stage is defined to study the barrel under thermomechanical loading.

To further investigate the behavior of a thick cylinder in the thermomechanical cycle with cracking, a numerical simulation model with crack lengths of 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 14, 12, 16, 18, 20, and 25 mm has been developed. Due to the limitations of the Abaqus software, it is not possible to model

it in a single file. In all models, the tip of the crack is spider meshed. In the analysis used at the crack tip, the J-integral is calculated and a contact mode is defined on the internal faces of the crack so that they do not overlap during compressive loading. Also, a rigid interaction mode is defined between steel and composite in composite design.

A multi-physics numerical simulation model was used to analyze the effect of crack length on the fatigue life of autofrettaged and non-autofrettaged thick cylinders during operation. In this simulation, the barrel with two different types of ST52 steel and SiC/Ti-24Al-11Nb metallic matrix composite with diameters 25, 50, and 75% of the total diameter of the barrel as recommended [1] has been studied. The mechanical properties of the mentioned materials are listed in Table 1. Other properties, including thermal expansion coefficients, specific heat coefficients, density, and plastic properties at different temperatures, which amount to more than, are also used

The temperature on the inner surface of the cylinder is defined as heat flux. The heat flux value of 5400 W/m² is used for all simulations. An initial temperature of 25°C is defined for the entire model. The element type was CPE4T. The model was checked for mesh dependence and during meshing, the aspect ratio was maintained below 1.3.

*Corresponding author's email: m_azadi@semnan.ac.ir



Table 1. Mechanical properties of the materials, used in this analysis

Properties	Unit	ST52	SiC	Ti-24Al-11Nb
Conductivity	W(mK) ⁻¹	53.3	-	6.7
Young's modulus	GPa	212	399.9	110.3
Yield stress	MPa	452.5	-	371.6
Poisson's ratio	-	0.29	0.25	0.26

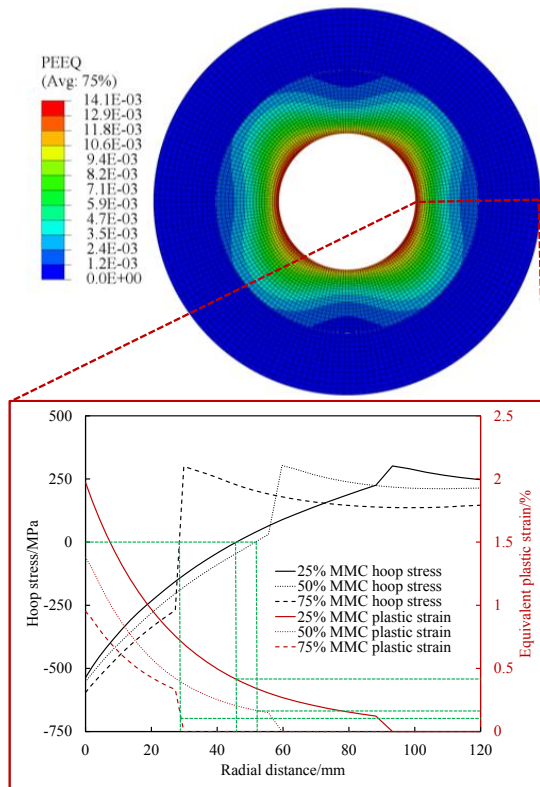


Fig. 1. The hoop stress and the equivalent plastic strain along the radius in the cylinder with ST52 steel and metal-matrix composite materials

3- Results and Discussion

In general, autofrettage is used to create residual compressive hoop stresses inside thick-walled cylinders to improve their fatigue life during work. many researchers have worked on improving the integrity of thick-walled cylinders made of different materials [2, 3]. In addition, they developed models for the optimal estimation of loading and unloading pressures of autofrettage [4, 5] have created. The more important challenge is still in understanding the useful life of these autofrettaged thick-walled cylinders under complex thermal and mechanical loading cycles.

In this research, a study with numerical simulation of the cracked and uncracked barrel has been done for 20 thermomechanical cycles. The numerical model includes

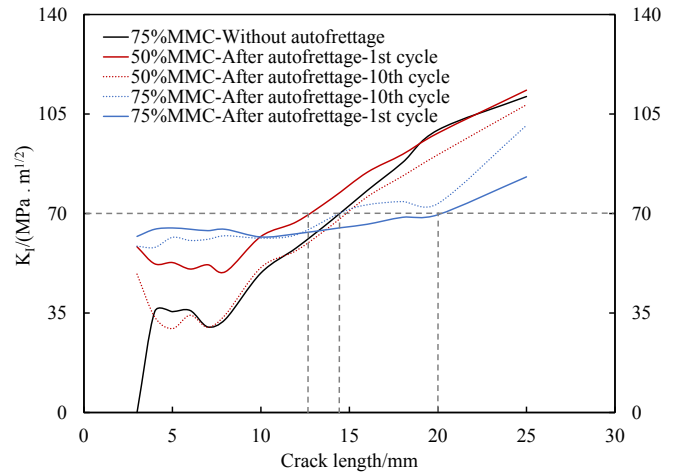


Fig. 2. The comparison of the stress intensity factor versus the length in autofrettaged and non-autofrettaged cylinders with the composite ratio of 75% and 50%

thermal, mechanical, and fatigue crack mechanics. The studied materials are ST52 steel and SiC/Ti-24Al-11Nb metal matrix composite. The applied boundary conditions are similar to the barrel during operation.

Four stress conditions have been investigated in this study at a temperature of 25-950°C and a pressure of 100-400 MPa during the loading cycle. Very high tensile stress is also observed after the first cycle. Through various studies, it has been determined that the first cycle is the most harmful cycle for thermal fatigue loading, such as Oudin et al. [6], who conducted an experiment on engine pistons to determine that the first cycle is the most damaging. Therefore, it is also common to preheat the barrel before operating.

Equivalent plastic strain and hoop stress after autofrettage are plotted in Fig. 1. It can be seen, the barrel is plastically deformed to the depth of the common diameters of the two materials, and after that, there is no plastic pressure in the composite. Also, with the increase of the composite ratio around the steel, the value of the maximum hoop stress is decreasing, but the amount of plastic before zero in the joint diameter is increasing.

In the cracked cylinder without autofrettage, due to the thermo-mechanical cycle and the softening of the material in front of the crack tip, the J-integral value decreases with the thermal cycle. The comparison of the calculated stress intensity factor (K_I) of autofrettaged and non-autofrettaged cylinders with different crack lengths is shown in Fig. 2.

However, it should be noted that for the value of K_I higher than K_{IC} (70 MPa.m^{1/2} [7, 8]) in the cylinder design with 50% of the composite ratio if the crack length is 13 mm in the first cycle and 14 mm in the 10th cycle, as well as 14 mm for the composite design in the cylinder with 75% of the composite ratio for the first cycle without autofrettage and 20 mm for the first cycle with autofrettage, the barrel will probably explode.

4- Conclusions

A multi-physics numerical simulation model was used to analyze the effect of crack length on the fatigue life of autofrettaged and non-autofrettaged barrels during operation. The used material for the barrel was ST52 steel along with SiC/Ti-24Al-11Nb metal-matrix composite in the ratio of diameters .of 25, 50, and 75% to each other was studied

The numerical simulation model was carried out under plane strain conditions by applying thermo-mechanical loading. This study also contributed to the analysis of crack initiation and growth behavior under complex loading conditions during the service life of the barrel

The following results were obtained from this study:

- Autofrettage practically does not make the inner surface of the cylinder resistant to the severe operating conditions it experiences. It was observed that the range of stress on the surface even increases. However, autofrettage causes residual compressive stress not only on the surface but also on the barrel.

- The barrel is only able to withstand the conditions in the case of a 75% composite ratio without cracks and without autofrettage. In addition to this ratio, the value of 50% for the ratio with autofrettage is also able to withstand the conditions. 25% of the composite ratio is only able to withstand the condition without cracks.

- This residual compression plays an important role in the crack tip and limits crack growth. It was observed that up to a depth of 9 mm for ST52 steel and metal matrix composite, autofrettage has a significant effect on increasing the life of the barrel.

- In the barrel, the crack growth at 75% of the composite ratio is reduced to half of the case without autofrettage in autofrettage. But at a 50% composite ratio in autofrettage, the growth rate is higher than 75% of the composite ratio without autofrettage.

- If cracks appear on the inner surface as a result of erosion, due to thermal softening and a very high amount of tension at the tip of the crack during conditions, the cracks can grow and only the amount compared to the state without

autofrettage is reduced.

- After autofrettage, the radial stresses are not affected at the first. However, the plastic strain in the material is accelerated during operation. This affects the softening of the material, which is a negative effect of the autofrettage process.

- The developed model and method can be used to analyze complex phenomena and become useful.

References

- [1] R.S. Salzar, Influence of autofrettage on metal matrix composite reinforced gun barrels, *Composites Part B: Engineering*, 30(8) (1999) 841-847.
- [2] J. Underwood, G. Vigilante, C. Mulligan, Review of thermo-mechanical cracking and wear mechanisms in large caliber guns, *Wear*, 263(7-12) (2007) 1616-1621.
- [3] J.H. Underwood, E. Troiano, Critical fracture processes in army cannons: a review, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 125(3) (2003) 287-292.
- [4] A. Mishra, A. Hameed, B. Lawton, A novel scheme for computing gun barrel temperature history and its experimental validation, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 132(6) (2010) 061202.
- [5] J.H. Underwood, M.D. Witherell, S. Sopok, J.C. McNeil, C.P. Mulligan, G.N. Vigilante, Thermomechanical modeling of transient thermal damage in cannon bore materials, *Wear*, 257(9-10) (2004) 992-998.
- [6] A. Oudin, P. Lamesle, L. Penazzi, S. Le Roux, F. Rezai-Aria, Thermomechanical fatigue behavior and life assessment of hot work tool steels, *European structural integrity society*, 29 (2002) 195-201.
- [7] Astm STP590 Standard, A symposium sponsored by Committee E-24 on Fracture Testing of Metals, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS Brown University, Providence, R. I., 26-28 Aug, (1974).
- [8] W. Hesse, K. Brueninghaus, W. Dahl, Yielding- and fracture behavior of ferritic steels in the transition region of quasistatic to dynamic loading, *Nuclear Engineering and Design*, 96(2/3) (1986) 167-172.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Sayar, R. Molahamzadeh, M. H. Korani, M. Azadi, Study of Autofrettage Process Effect in Thick-walled Cylinder with Metal Matrix Composite by the method of Finite Element Cyclic Stress Analysis, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(8) (2022) 375-378.

DOI: [10.22060/mej.2022.20983.7353](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20983.7353)





مطالعه تأثیر فرآیند اتوفرتاژ در استوانه جدار ضخیم با کامپوزیت زمینه فلزی به روش تحلیل اجزای محدود تنش چرخه‌ای

حسن سیار^۱، رامین ملاحمزه‌زاده^۲، محمد حسین کرانی^۱، محمد آزادی^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

کلمات کلیدی:

استوانه جدار ضخیم

اتوفرتاژ

کامپوزیت زمینه فلزی

شبیه‌سازی عددی

ترک

خلاصه: هدف از این مطالعه، تجزیه و تحلیل تأثیر متقابل خواص مکانیکی و حرارتی و بار چرخه‌ای ترمومکانیکی اعمال شده همراه با ترک، در یک لوله جدار ضخیم است. بنابراین یک پژوهش با شبیه‌سازی عددی استوانه جدار ضخیم با بارگذاری چرخه‌ای حرارتی- مکانیکی انجام شده است. شرایط مرزی اعمال شده مشابه لوله سلاح در هنگام شلیک مداوم است. چهار شرط تنش در دمای ۲۵-۹۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱۰۰-۴۰۰ مگاپاسکال در طول چرخه بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط عبارتند از اول بارگذاری حرارتی- مکانیکی بدون اتوفرتاژ و بدون ترک، دوم حرارتی- مکانیکی با اتوفرتاژ بدون ترک، سوم بارگذاری حرارتی- مکانیکی در لوله دارای ترک بدون اتوفرتاژ با افزایش طول ترک و چهارم بارگذاری حرارتی- مکانیکی در لوله اتوفرتاژ شده دارای ترک با افزایش طول ترک. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی لوله اتوفرتاژ شده و بدون اتوفرتاژ دارای اطلاعاتی در مورد گسترش کرنش‌ها و تنش‌ها در لوله است. مواد مورد مطالعه در لوله، فولاد و کامپوزیت زمینه فلزی در سه نسبت قطر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به یکدیگر است. گرایش کلی بارگذاری در لوله اتوفرتاژ شده منجر به اثر نرم شدن سطح لوله می‌شود. این پدیده به عنوان کاهش سختی سطح داخلی لوله مشاهده می‌شود. همچنین حداکثر تنش ناشی از چرخه ترمومکانیکی تا عمق ۹ میلی‌متر برای لوله با طراحی ترکیبی وجود دارد و پس از آن تغییرات حداقلی است. این عمق فعال برای شروع ترک است.

۱- مقدمه

پسماند فشاری باعث افزایش ظرفیت بارگذاری در استوانه‌ها می‌شود. تحلیل رفتار استوانه‌های جدار ضخیم در شرایط کاری مختلف اهمیت زیادی دارد. در اکثر موارد، وجود ترک در دیواره استوانه جدار ضخیم محتمل است، بنابراین ضرورت بررسی و تحلیل از دیدگاه مکانیک شکست را ایجاد می‌کند. ترک‌ها می‌توانند ناشی از خوردگی، برخورد جسم خارجی، عیوب به وجود آمده در حین فرآیند تولید و غیره باشند.

در دهه‌های اخیر نیز استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع نظامی، هوا- فضا و غیره گسترش زیادی یافته است. از جمله مزیت‌های بارز این گونه مواد که باعث گسترش آنها شده است، می‌توان به مواردی مانند: وزن کم، نسبت استحکام به وزن بالا، عمر طولانی، عایق حرارتی و صوتی، میرایی و کاهش ارتعاشات اشاره نمود. لوله ادوات نظامی به عنوان اصلی‌ترین قسمت، معمولاً تحت تأثیر بارهای دینامیکی و نیز در بارگذاری‌های متوالی، تحت بارهای چرخه‌ای قرار دارد که باعث بروز پدیده خستگی در سازه می‌گردد. به منظور کاهش وزن سلاح‌ها استفاده از کامپوزیت‌ها راهکار مناسبی به نظر می‌رسد که اخیراً مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است.

مخازن تحت فشار و در حالت کلی‌تر استوانه‌های جدار ضخیم یکی از پر کاربردترین قطعات در صنعت می‌باشند. این استوانه‌ها به طور گسترده‌ای در صنایع نظامی، شیمیایی و هسته‌ای استفاده می‌شوند. به منظور صرفه جویی در مواد و کاهش هزینه‌های تولید، بسیاری از محققان و مهندسان درصدد هستند که استفاده بهینه از مواد را در اولویت قرار دهند. یکی از روش‌های بهینه در تولید استوانه‌های جدار ضخیم، طراحی براساس روش‌های الاستیک-پلاستیک می‌باشد.

از جمله این روش‌ها که استفاده موثرتر و بهتر در تولید استوانه‌های جدار ضخیم را فراهم می‌کند، فرآیند اتوفرتاژ^۱ می‌باشد. اتوفرتاژ فرآیندی است که با اعمال فشار داخلی بسیار زیاد در استوانه‌های جدار ضخیم و باربرداری می‌تواند تنش‌های پسماند فشاری را در جداره استوانه ایجاد کند. تنش‌های

1 Autofrettage

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_azadi@semnan.ac.ir



است. کلارک^۹ [۱۰] با انجام آزمایش و همچنین روابط تئوری نشان داد که فرایند اتوفرتاژ می‌تواند نقش مهمی در کاهش شدت تنش و رشد ترک خستگی واقع در شعاع داخلی مخازن جدار ضخیم داشته باشد. همچنین تعیین پارامترهای شکست در حضور میدان‌های تنش باقیمانده در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. پرل^{۱۰} [۱۱] در سال ۱۹۹۲ به بررسی ضریب شدت تنش در یک مخزن تحت فشار و همچنین اتوفرتاژ شده پرداخت و نشان داد که در مخازن اتوفرتاژ شده و به دلیل وجود تنش‌های باقیمانده فشاری در اطراف ترک، مقادیر این ضریب بصورت منفی می‌باشد. وی با بررسی عددی ۶۰۰ نمونه مختلف دارای چندین ترک شعاعی با فاصله محیطی یکسان، روابطی برای حالت عمومی مسئله نیز بیان نمود. یانگ^{۱۱} [۱۲] با فرض مکانیک شکست الاستیک خطی، ضریب شدت تنش محیطی مربوط به ترک‌های محوری سراسری را در یک مخزن تحت فشار اتوفرتاژ دارای رفتار سخت شونده و به روش‌های المان مرزی و تابع وزنی، محاسبه و با یکدیگر مقایسه نمود.

شو^{۱۲} و همکاران [۱۳] ضریب شدت تنش برای انواع ترک و شرایط بارگذاری در یک مخزن اتوفرتاژ شده و تحت فشار کاری را به روش المان محدود بدست آورده و نشان دادند که نمی‌توان از اصل جمع آثار خطی برای تعیین ضریب شدت تنش کلی یک مخزن استفاده نمود. بعبارت دیگر مقدار جمع خطی ضریب شدت تنش ناشی از فرایند اتوفرتاژ و ضریب ناشی از فشار کاری، با ضریب شدت تنش کلی مخزن در برخی شرایط با یکدیگر تفاوت چشمگیری دارند. ژو^{۱۳} و همکاران [۱۴] به بررسی استحکام خستگی مخازن دارای تنش‌های پسماند و تحت فشار کاری در دو نمونه راکتور پرداختند. آن‌ها نشان دادند که گرچه فرایند اتوفرتاژ می‌تواند تأثیر چشمگیری در افزایش عمر خستگی مربوط به پیدایش ترک داشته باشد ولی تأثیر فرایند در عمر خستگی مربوط به رشد ترک به مراتب کمتر می‌باشد، لذا بیشتر تلاش‌ها بایستی معطوف به جلوگیری از پیدایش ترک در سطوح داخلی و خارجی مخازن شود.

گوش‌ها ممکن است به طور دائمی در معرض نویز بالای ۸۵ دسی‌بل آسیب ببینند. تیراندازی، صدایی در سطوح بین ۱۵۰ تا ۱۶۵ دسی‌بل تولید می‌کند. با تخریب بافت شنوایی در ۱۸۰ دسی‌بل، قرار گرفتن محافظت نشده در معرض تیراندازی یک خطر جدی است. در موقعیت‌های جنگی، بسیاری

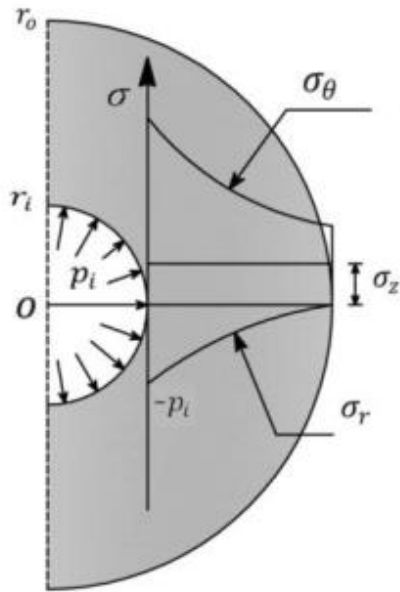
اولین مشاهده از اثر تنش‌های پسماند در بالا بردن عمر خستگی سیلندرهای تحت فشار، در سال ۱۸۴۷ توسط یک افسر توپخانه آمریکا به نام جکسون رامدن^۱ ثبت شد. او بدون اینکه از نظر علمی اثر تنش‌های پسماند را در تحکیم سیلندرهای تحت فشار بداند، فرآیندی برای ساخت لوله‌های توپ طراحی کرد. بدین صورت که بعد از قالب‌گیری، با خنک کردن سریع درون لوله توپ به کمک آب، ایجاد نوعی تنش پسماند در جدار داخلی سیلندر می‌نمود. ولیکن تحقیقات جدی در ارتباط با اثرات فرآیند اتوفرتاژ تقریباً ۱۰۰ سال بعد و در سال ۱۹۵۰ آغاز شد [۱]. اتوفرتاژ روشی کارآمد جهت افزایش ظرفیت تحمل فشار و عمر خستگی از طریق ایجاد تنش‌های پسماند مفید در جداره مخازن می‌باشد. میزان تنش‌های باقیمانده پس از انجام اتوفرتاژ به جنس سیلندر، فشار اعمال شده، استحکام تسلیم و نسبت قطر داخلی به خارجی سیلندر بستگی دارد. تکنیک اتوفرتاژ توسط افرادی همچون منینگ^۲ [۲]، چن^۳ [۳]، شاونینگ و گانگ لینگ^۴ [۴]، در طول سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفت. قسمت حساس و تعیین کننده برای شبیه‌سازی فرایند اتوفرتاژ، مدل کردن ناحیه پلاستیک ماده می‌باشد.

یانگ و زو^۵ [۵] مدل مخزن را به صورت الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفتند و شعاع بهینه اتوفرتاژ را بر این مبنای استخراج کردند. ونگ^۶ [۶] در سال ۱۹۸۹ با ارائه روش تحلیلی، روابطی برای توزیع تنش در سیلندرهای با شرایط کرنش صفحه‌ای استخراج نمود. اکسین لین^۷ [۷] و [۸] در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ در سه مقاله متوالی به ارائه روابط پارامتری فرایند اتوفرتاژ با لحاظ کرنش سختی، برای حالت تنش صفحه‌ای سیلندر با تغییر شکل‌های کوچک و بزرگ پرداخت. در این مقالات از مدل لوی میز برای تحلیل سیلندر کمک گرفته شد که خود باعث خطا در این روابط می‌گردد. همچنین وانلین^۸ [۹] نیز با ارائه روشی، تحلیل و عددی با در نظر گرفتن سخت شونده رمبرگ تنش‌های پسماند را در استوانه‌ای تحت فشار بدست آورد.

با توجه به تأثیر مثبتی که فرایند اتوفرتاژ در بهبود عملکرد مخازن دارای ترک می‌تواند داشته باشد، تحقیقات جدیدی در این زمینه آغاز شده

- 1 Jackson Romdan
- 2 Maning
- 3 Chen
- 4 Xiaoying and Gangling
- 5 Yang and Zhu
- 6 Wang
- 7 Xinlin
- 8 Wanlin

- 9 Clark
- 10 Perl
- 11 Yong
- 12 Shu
- 13 Zhu



شکل ۱. توزیع تنش در یک استوانه جدار ضخیم با فشار داخلی p_i

Fig. 1. The stress distribution in a thick-walled cylinder with p_i of the internal pressure

۲- روش تحقیق

با توجه به شکل ۱ که یک استوانه جدار ضخیم با فشار داخلی p_i را نشان می‌دهد، معادلات اساسی حاکم بر مخازن تحت فشار که به معادلات لامه معروف می‌باشند در منابع و مراجع ذکر شده‌اند [۲۱].

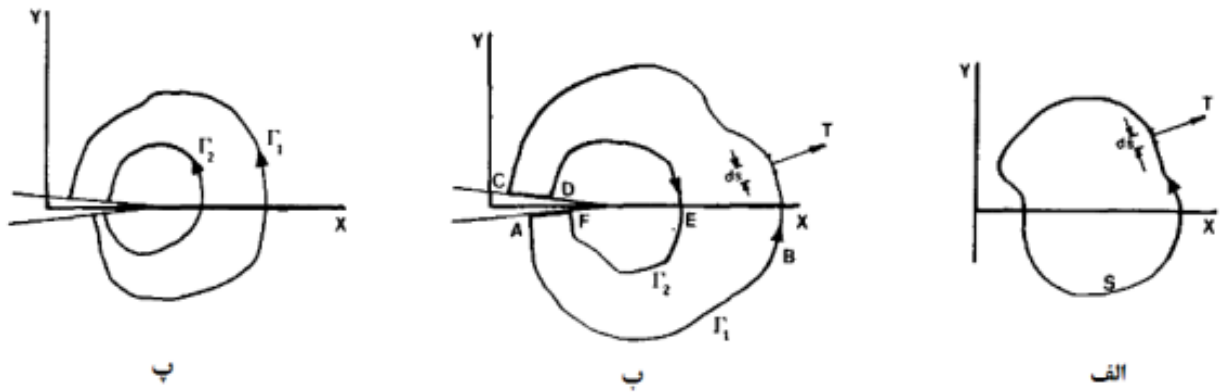
تنش σ_z در حالتی که انتهای استوانه باز باشد دارای مقداری برابر صفر است و در حالتی که انتهای استوانه بسته باشد از معادله بالا محاسبه می‌شود. که r_i شعاع داخلی، r_o شعاع خارجی و ρ شعاع ناحیه پلاستیک است. اولین گام در بررسی یک ترک، تحلیل تنش نمونه ترک دار است که توسط آن بررسی رشد ترک امکان پذیر می‌شود. برای متمایز نمودن تنش برای مودهای مختلف تغییر شکل، مناسب است سه مود مختلف برای تغییر شکل نسبی سطوح ترک تعریف گردد.

- مود I یا مود بازشدگی؛ که متداول‌ترین فرم گسیختگی در اثر رشد ترک است، در این مود، سطوح ترک به طور عمود بر هم در جهت مخالف یکدیگر تغییر مکان می‌دهند.
- مود II یا مود برشی؛ در این مود دو سطح ترک نسبت به هم در جهت عمود بر خط پیشانی ترک می‌لغزند.
- مود III یا مود پارگی؛ در این مود دو سطح ترک در جهتی موازی خط پیشانی ترک نسبت به یکدیگر می‌لغزند [۲۱].

از پرسنل نظامی نمی‌توانند به سادگی قبل از تخلیه سلاح‌های خود، محافظ شنوایی قرار دهند. راه حل فعلی برای کاهش سطوح سر و صدای اسلحه گرم عبارت است از اتصال یک دستگاه سرکوب کننده فلز که صدا را تا حدود ۱۲۰ دسی‌بل کاهش می‌دهد [۱۵ و ۱۶]. از مزایای دیگر لوله سلاح پیچیده شده با کامپوزیت می‌توان به: کاهش وزن، افزایش دقت و افزایش اتلاف گرما اشاره کرد [۱۷]. اسلحه‌های کالیبر بزرگی نیز برای نیروی دریایی ایالات متحده با فناوری پوشش کامپوزیت ساخته شده است. لیتلفیلد^۱ و همکاران [۱۸ و ۱۹] ساخت و آزمایش گسترده‌ای روی لوله‌های تفنگ ۱۲۰ میلی‌متری کامپوزیتی انجام داده‌اند، که این کار منجر به تولید لوله‌های تفنگی شده است که ۹۳ کیلوگرم سبکتر از همتای تمام فولادی خود هستند. تنش ناشی از پاسخ دینامیکی در لوله‌های فولادی پیچیده شده با کامپوزیت [۲۰] مدلسازی شده و نشان داده شده است.

همانطور که قبلاً بیان شد مخازن جدار ضخیم، کاربردهای فراوانی در صنعت دارند. با توجه به اینکه معمولاً این گونه مخازن تحت فشارهای داخلی بالایی قرار می‌گیرند، وجود نقص و ترک و متعاقب آن شکست مخزن می‌تواند آسیب‌های بسیار جدی و هزینه بری را به بار آورد که در نتیجه باتوجه به اهمیت مسئله بایستی در طراحی آنها مورد توجه قرار گیرد. روش‌های گوناگونی در زمینه افزایش عمر خستگی و مقاومت ماده در برابر شکست وجود دارد که یکی از راهکارهای موجود در این زمینه، استفاده از تنش‌های پسماند برای جلوگیری از پیدایش و رشد ترک می‌باشد. برای این منظور می‌توان از فرایند اتوفرتاژ بهره برد که می‌تواند با ایجاد تنش‌های پسماند، توزیع تنش اطراف ترک را تحت تأثیر قرار داده و بسته به موقعیت ترک و بارگذاری، شکست را به تأخیر بیندازد.

به عنوان نوآوری و تفاوت این مقاله نسبت به مطالعات گذشته، می‌توان به اعمال بارهای ترمودینامیکی در یک استوانه جدار ضخیم با دو جنس متفاوت فولاد ST۵۲ و کامپوزیت زمینه فلزی SiC/Ti-۲۴Al-۱۱Nb با درصد قطرهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ از کل قطر لوله، در چهار حالت بارگذاری حرارتی- مکانیکی بدون اتوفرتاژ و بدون ترک، حرارتی- مکانیکی با اتوفرتاژ بدون ترک، بارگذاری حرارتی- مکانیکی در لوله دارای ترک بدون اتوفرتاژ با افزایش طول ترک و بارگذاری حرارتی- مکانیکی در لوله اتوفرتاژ شده دارای ترک با افزایش طول ترک اشاره کرد.



شکل ۲. کانتور وابسته به مسیر برای جسم الاستیک ترک دار. الف) جسم الاستیک، ب) جسم ترک دار، پ) کانتور مستقل از مسیر [۲۳]

Fig. 2. The path-dependent contour for a cracked elastic material: a) the elastic material, b) the cracked material, and c) the path-independent contour

همچنین مقدار ضریب شدت تنش از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$K_I = \sqrt{JE / (1 - \nu^2)} \quad (3)$$

۲-۱- مواد مورد استفاده

در این شبیه‌سازی، لوله سلاح با دو جنس متفاوت فولاد ST۵۲ و کامپوزیت زمینه فلزی SiC/Ti-۲۴Al-۱۱Nb با درصد قطرهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ از کل قطر لوله که توصیه شده [۲۴]، مورد مطالعه قرار گرفته است. خواص مکانیکی مواد ذکر شده در جدول ۱ آمده است. سایر خواص اعم از: ضرایب انبساط حرارتی، ضرایب گرمایی ویژه، چگالی و خواص پلاستیک در دماهای متفاوت که خود بالغ بر بیش از ۴۳۴۰ تعداد داده هستند نیز از منابعی که بصورت عملی و آزمایشگاهی این خواص را استخراج کرده‌اند [۲۵-۳۱] مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- مدل حرارتی- مکانیکی

با در نظر گرفتن لوله بلند اسلحه، فرض بر این است که تقریباً هیچ تغییر شکل در طول، یعنی محور Z وجود نخواهد داشت که با توجه به مطالعه محققان [۳۲] نتایج این نوع شبیه‌سازی‌ها در حالت ۳ بعدی و ۲ بعدی یکسان بوده و فقط زمان و هزینه را افزایش می‌دهد. بنابراین، هر راه حلی در این جهت نادیده گرفته می‌شود (شرایط کرنش صفحه‌ای). این فرض مسئله

مقدار بحرانی ضریب شدت تنش در یک درجه حرارت معین، تابعی از ضخامت قطعه ترک‌دار و طول ترک است. هنگامی که شرایط تنش صفحه‌ای باشد، این کمیت با K_C بیان می‌شود که برابر است با مقدار بحرانی ضریب شدت تنش K ، هنگامی که شکست رخ می‌دهد. برای حالتی کرنش صفحه‌ای این کمیت با K_I نمایش داده می‌شود. در این حالت مقدار K_{IC} وابسته به ضخامت نمونه نیست. زیر نویس I اشاره به مود اول شکست دارد. در حالت کرنش صفحه‌ای K_{IIC} و K_{IIIC} اشاره به چقرمگی شکست در مود دوم و مود سوم شکست دارد [۲۲].

معادله انتگرال J (قابل استفاده برای کلیه حالت‌های بارگذاری، هندسه و ترک) معمولاً در منابع به شکل زیر تعریف می‌گردد [۲۳]:

$$J = \oint \left(Mdy - T_i \frac{du_i}{dx} ds \right) \quad (1)$$

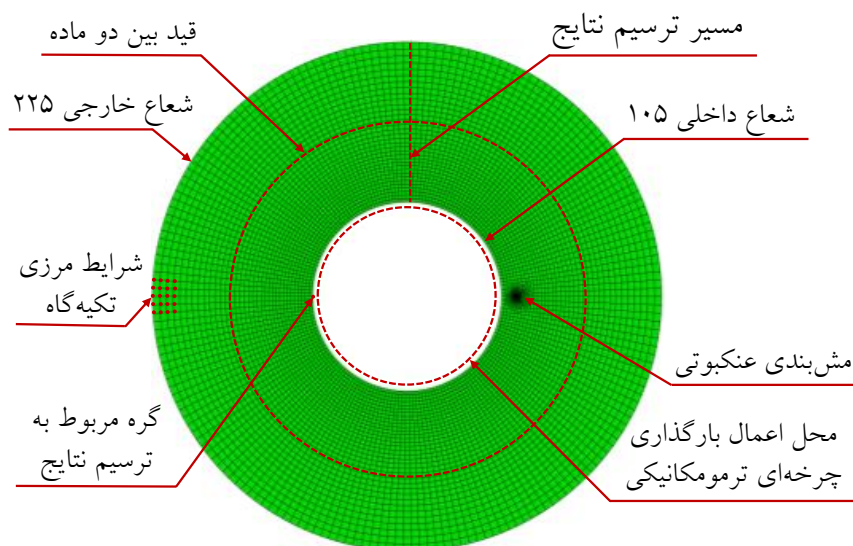
$$J = \int_{\Gamma} M \delta_{ij} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} n_i ds \quad (2)$$

که در آن M چگالی انرژی کرنشی، (که در شکل ۲ نشان داده شده است) یک مسیر بسته، T_i کنش اعمالی بر s، u مؤلفه‌های بردار جابجایی و ds جزئی از مسیر S می‌باشد.

جدول ۱. خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در تحلیل‌ها [۲۵-۳۱]

Table 1. Mechanical properties of the materials, used in this analysis [25-31]

مشخصه	واحد	ST۵۲	SiC	Ti-۲۴Al-۱۱Nb
ضریب انتشار	$W(mK)^{-1}$	۵۳/۳	-	۶/۷
مدول یانگ	GPa	۲۱۲	۳۹۹/۹	۱۱۰/۳
تنش تسلیم	MPa	۴۵۲/۵	-	۳۷۱/۶
ضریب پواسون	-	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۲۶



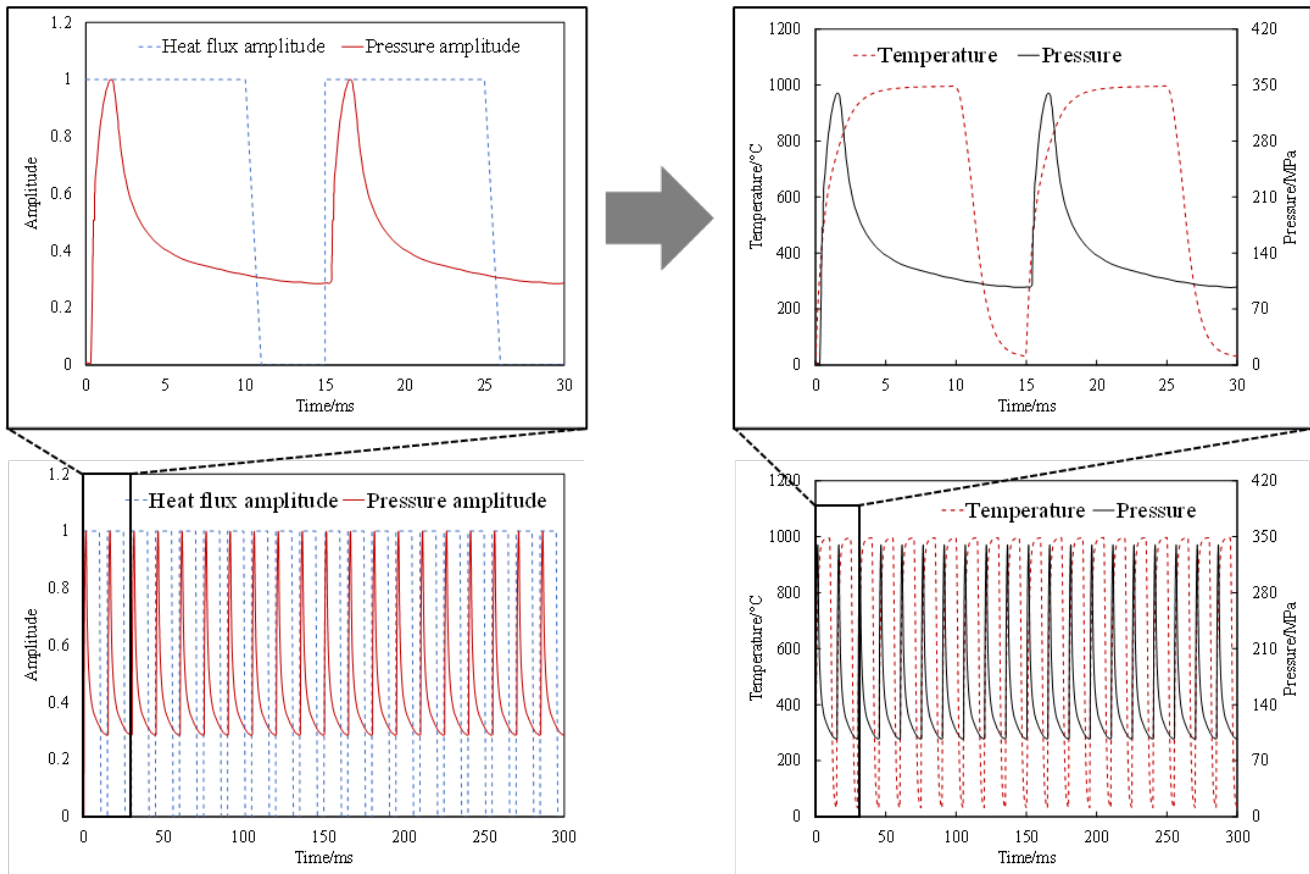
شکل ۳. هندسه مدل مورد استفاده شده

Fig. 3. The geometry of the used model

گذرا برای مطالعه تحت بارگذاری ترمومکانیکی بدون اتوفرتاژ. دوم با مرحله حرارتی مکانیکی اولیه که در آن دما در ۲۵ درجه سانتیگراد نگه داشته می‌شود و فشار داخلی ۵۱۵، ۵۲۵ و ۵۳۵ مگاپاسکال به توجه به نسبت قطرهای داخلی و خارجی لوله با فولاد ST۵۲ [۳۷] اعمال می‌شود. این باعث ایجاد یک تنش محیطی پسماند به بزرگی مقادیر ذکر شده در سطح داخلی لوله می‌شود. در پایان این مرحله، تنش‌های باقیمانده داخلی، روی سطح و تا عمق خاصی در لوله گسترش می‌یابد و سپس مرحله حرارتی مکانیکی گذرا برای مطالعه لوله تحت بارگذاری ترمومکانیکی تعریف می‌شود.

را به حالت دو بعدی ساده می‌کند و زمان و هزینه محاسبه را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، یک هندسه دوبعدی شبیه لوله سلاح (فقط منطقه مورد فرسایش زیاد) با قطر داخلی و خارجی ۱۰۵ میلی‌متر و ۲۲۵ میلی‌متر برای کل مدل و برای کامپوزیت پایه فلزی با قطرهای داخلی ۱۹۵، ۱۶۵ و ۱۳۵ میلی‌متر مدل‌سازی گردیده است. در تکنیک اتخاذ شده برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی از مطالعه محققان استفاده گردیده است [۳۳-۳۶].

دو نوع مدل توسعه یافته است. ابتدا تنها با ۱ مرحله حرارتی مکانیکی



شکل ۴. دامنه فشار و دما برای مطابقت دقیق شرایط مرزی اعمال شده با مشاهدات تجربی [۳۲]

Fig. 4. Pressure and temperature amplitudes to accurately match the applied boundary conditions with experimental observations [32]

واقعی هستن، که در تحقیقات دیگر منتشر شده است [۳۸ و ۳۹]. لازم به ذکر است تعداد ۴۸ تحلیل با حجم داده بیش از ۸۵ گیگابایت در این پژوهش انجام شده است.

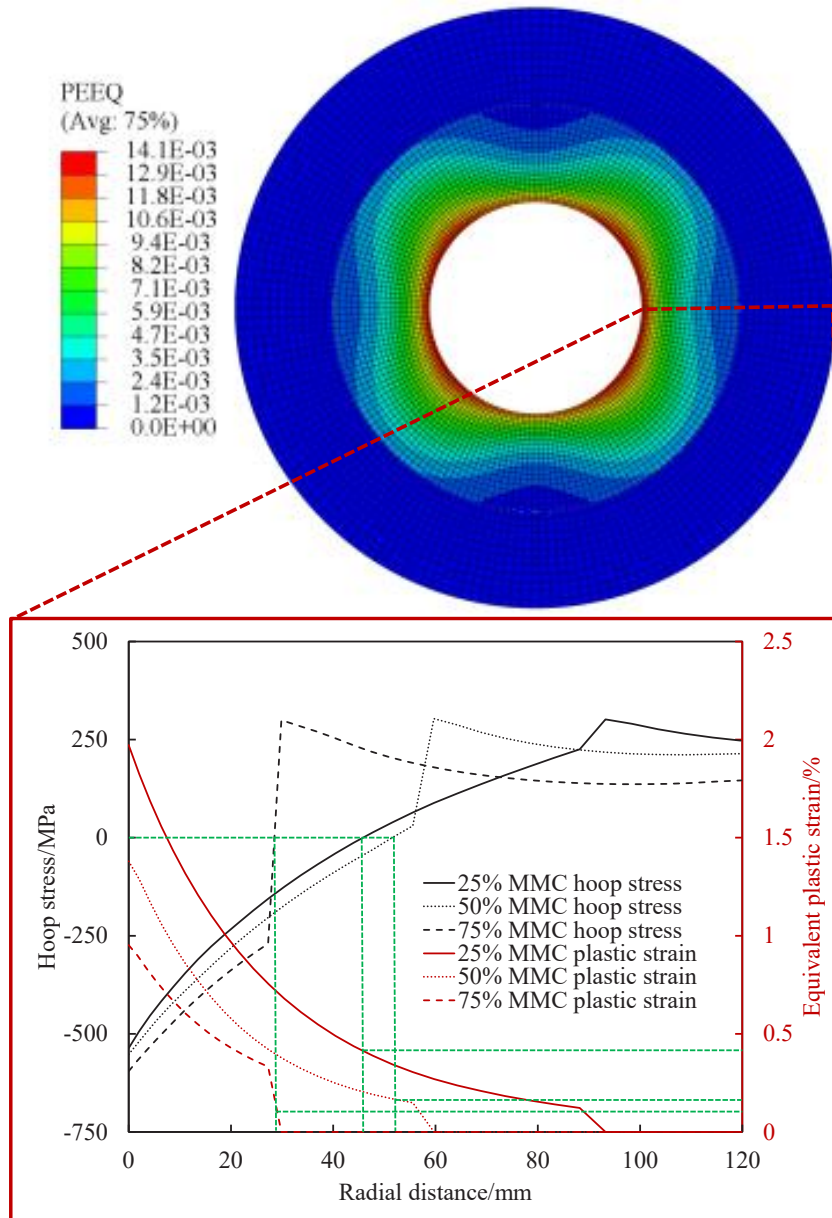
۲-۴- بارگذاری خستگی حرارتی- مکانیکی در لوله بدون اتوفرتاژ

این مدل برای مطالعه گسترش تنش‌ها و کرنش‌ها در لوله، توسعه یافته است. بار حرارتی ۲۰ چرخه‌ای با دما بین ۲۵ تا ۹۷۰ درجه سانتیگراد و فشار بین ۴۰۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال در هر چرخه در سطح داخلی لوله به طور همزمان در مرحله ترمومکانیکی گذرا اعمال می‌شود. دلیل بررسی ۲۰ چرخه مورد مطالعه، سنجش تعداد شلیک مداوم چندین اسلحه با مشخصات نزدیک به این ابعاد لوله می‌باشد.

۲-۳- شرایط مرزی

درجه حرارت در سطح داخلی لوله به عنوان شار حرارتی تعریف می‌شود. مقدار شار حرارتی 5400 W/m^2 برای همه شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود. دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد برای کل مدل تعریف شده است. نوع المان CPE4T، (کرنش صفحه‌ای ۴ گره‌ای چهار ضلعی حرارتی، جابجایی دو خطی و دما)، به دلیل نوع مسئله و بارگذاری حرارتی- مکانیکی، برای تولید مجموع ۶۰۰۰ المان و در مجموع ۶۲۰۰ گره در کل مجموعه استفاده می‌شود. همچنین مدل برای وابستگی مش بررسی شده و در طول مش بندی، نسبت ابعاد زیر $1/3$ حفظ شده است.

مجموعه مش بندی لوله در شکل ۳ نشان داده شده است. دامنه‌های اعمال شده دما و فشار برای به دست آوردن پروفایل مورد نظر در شکل ۴ نشان داده شده است. این پروفیل‌ها شبیه داده‌های مشاهده شده تجربی



شکل ۵. تنش محیطی و کرنش پلاستیک معادل در راستای شعاع در لوله ترکیبی فولاد ST52 و کامپوزیت زمینه فلزی

Fig. 5. The hoop stress and the equivalent plastic strain along the radius in the cylinder with ST52 steel and metal-matrix composite materials

پس از اتوفرتاژ، لوله تا عمق قطره‌های مشترک دو ماده به طور پلاستیک تغییر شکل می‌دهد و پس از آن در کامپوزیت هیچ گونه فشار پلاستیکی وجود ندارد. همچنین با زیاد شدن نسبت کامپوزیت دور فولاد، مقدار حداکثر تنش محیطی روند کاهشی دارد ولی مقدار پلاستیک قبل از صفر شده در قطر مشترک روند افزایشی را طی می‌کند.

۲. در مرحله دوم، ۲۰ چرخه بار حرارتی مکانیکی روی سطح داخلی لوله‌ها اعمال می‌شود تا رفتار لوله تحت چنین شرایط بارگذاری پس از تنش‌های فشاری داخلی مقایسه شود.

۲-۵- بارگذاری خستگی حرارتی- مکانیکی در لوله با اتوفرتاژ
یک مدل شبیه‌سازی دو مرحله‌ای برای مطالعه این رفتار توسعه داده شده است:

۱. لوله فولاد ST52 و کامپوزیت زمینه فلزی SiC/Ti-۲۴Al-۱۱Nb در مرحله اول، تحت فشارهای داخلی تا ۵۱۵، ۵۲۵ و ۵۳۵ مگاپاسکال [۳۷ و ۴۰] برای درصدهای ذکر شده کامپوزیت، قرار می‌گیرد و سپس بدون فشار تخلیه می‌شود. کرنش پلاستیک معادل پس از اتوفرتاژ نیز در شکل ۵ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که

۳- بحث و صحنه‌گذاری

در این پژوهش، اثر بارگذاری چرخه‌ای حرارتی- مکانیکی در لوله‌های سلاح مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر فرایند اتوفرتاژ در تنش‌های پسماند در سطح داخلی مشاهده می‌شود و اثربخشی این تنش‌های باقی‌مانده برای مقاومت در برابر تنش- کرنش ناشی از چرخه حرارتی- مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. ترک‌های با طول مختلف تعریف شده و جذب انرژی در نوک آنها برآورد و مقایسه می‌شود.

۳-۱- لوله بدون ترک و بدون اتوفرتاژ

برای درک رفتار تغییر شکل، تنش‌ها و کرنش‌ها، ضروری است که رفتار را بدون فرآیند اتوفرتاژ و نحوه تغییر شکل لوله و چگونگی شکل‌گیری تنش‌ها و کرنش‌ها در اثر بار حرارتی مکانیکی یکسان را مشاهده کرد.

۳-۱-۱- تنش محیطی

اثر بارگذاری چرخه‌ای حرارتی- مکانیکی بر تنش محیطی حاصله هنگامی که هیچ تنش پسماند مربوط به اتوفرتاژ وجود ندارد در سطح داخلی لوله شکل ۷ نشان داده شده است. در لوله در هر چرخه، در طول فرآیند گرمایش، تنش‌های فشاری پدید می‌آیند و در حین سرمایش، تنش‌های کششی شکل می‌گیرند. در لوله مشاهده می‌شود که میزان تنش‌های کششی ثابت می‌مانند ولی تنش‌های فشاری افزایش می‌یابند. تنش‌های محیطی بر روی سطح داخلی لوله ایجاد شده به دلیل بار چرخه‌ای ترمومکانیکی بدون اتوفرتاژ در اولین و آخرین چرخه بصورت جداگانه نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ در حین گرمایش، ۲ قله تنش فشاری در لوله مشاهده می‌شود. در لوله در هر دو چرخه اول و آخر پیک تنش کششی وجود دارد و تنش فشاری نیز در آخرین چرخه در اوج خود می‌باشد.

برای مقدار تنش محیطی حداکثر و حداقل در چرخه‌های اول و آخر، در نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴ ذکر شده در شکل ۷، در مسیر ذکر شده در شکل ۳، این مقدار ترسیم می‌شود، که در شکل ۸ در نسبت شعاع‌های مختلف بیان شده نشان داده شده است. این شکل، نمودارها را در مسیر شعاعی از سطح داخلی لوله به سطح بیرونی را رسم کرده است و مشخصات تنش ناشی از بارگذاری حرارتی- مکانیکی در طول شعاع را نشان می‌دهند. در لوله پس از عمق ۹ میلی‌متر، همه تنش‌های محیطی از نظر مقدار مشابه هستند.

۲-۶- بارگذاری خستگی حرارتی- مکانیکی در لوله با ترک بدون اتوفرتاژ

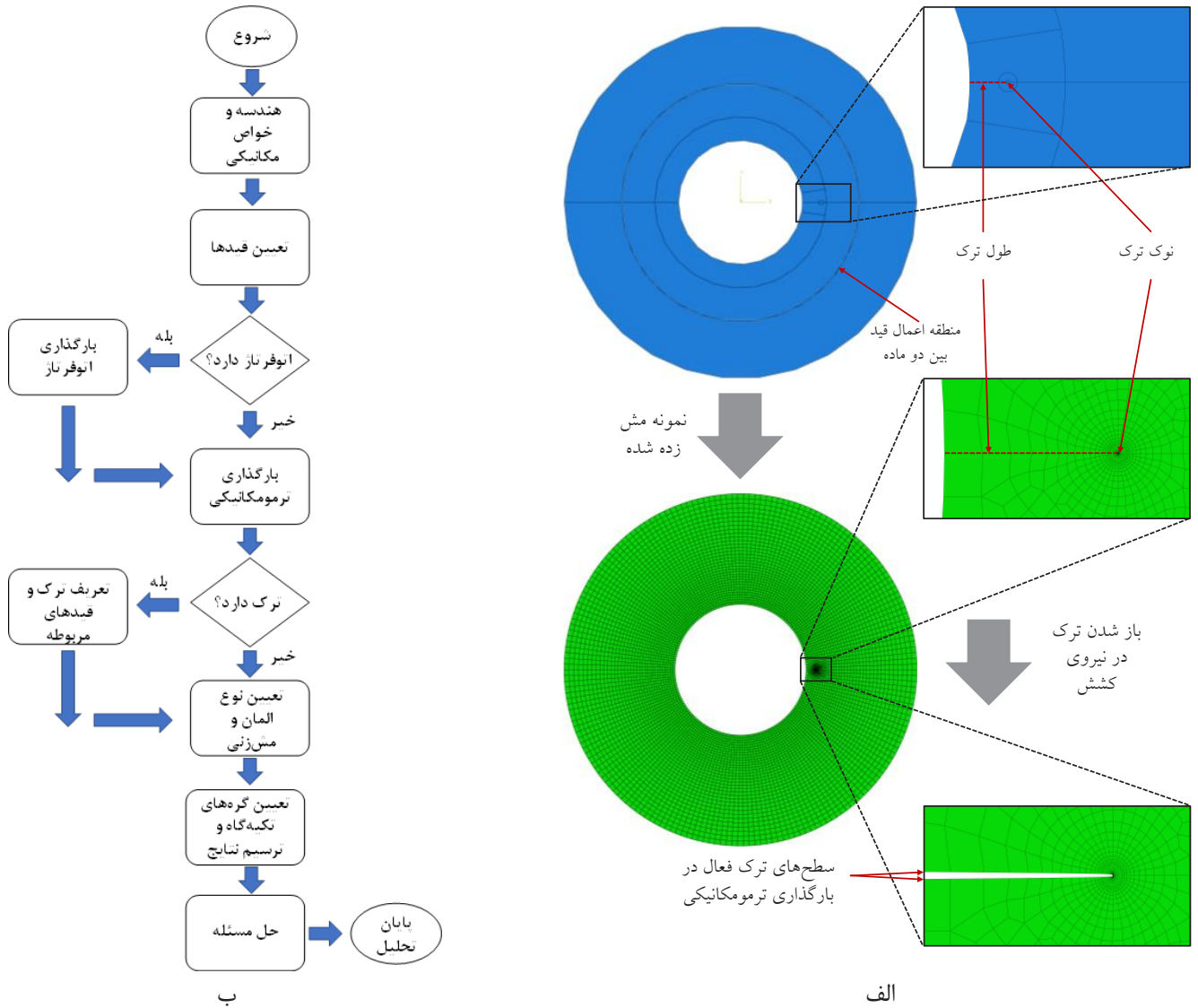
برای بررسی بیشتر رفتار یک لوله در چرخه ترمومکانیکی هنگام ترک خوردن یک مدل شبیه‌سازی عددی با با طول ترک ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر توسعه یافته‌اند که بر اساس دنباله‌ای است که توسط قیوم^۱ و همکاران [۴۱] منتشر شده است. در همه مدل‌ها، نوک ترک عنکبوتی مش‌بندی شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. در تحلیل استفاده شده در نوک ترک، J-انتگرال با فرمول پیشنهادی لی^۲ و همکاران [۴۲] محاسبه شده است و یک حالت تماس در وجوه داخلی ترک تعریف شده تا در حین بار فشاری روی هم قرار نگیرند [۴۳ و ۴۴]. همچنین یک حالت قید صلب نیز بین فولاد و کامپوزیت در طراحی ترکیبی تعریف شده است [۴۵]. چالش مدل‌سازی و مشکل پیچیده این است که به دلیل محدودیت‌های نرم‌افزار آباکوس^۳ امکان مدل‌سازی آن در یک فایل واحد وجود ندارد. به همین دلیل شبیه‌سازی‌ها با طول ترک ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر توسعه یافته‌اند.

۲-۷- بارگذاری خستگی حرارتی- مکانیکی در لوله با ترک با اتوفرتاژ

این قسمت بر درک رفتار انتشار ترک در لوله سلاح اتوفرتاژ شده به دلیل تنش‌های فشاری انباشته شده روی سطح داخلی لوله متمرکز شده است. این مطالعه به طور خاص بر مقاومت لوله در برابر انتشار ترک در حین کار متمرکز است. برای این منظور، مدل‌های شبیه‌سازی با بار حرارتی مکانیکی بر روی سطح داخلی لوله اتوفرتاژ شده هنگامی که ترک وجود دارد، توسعه داده شده است.

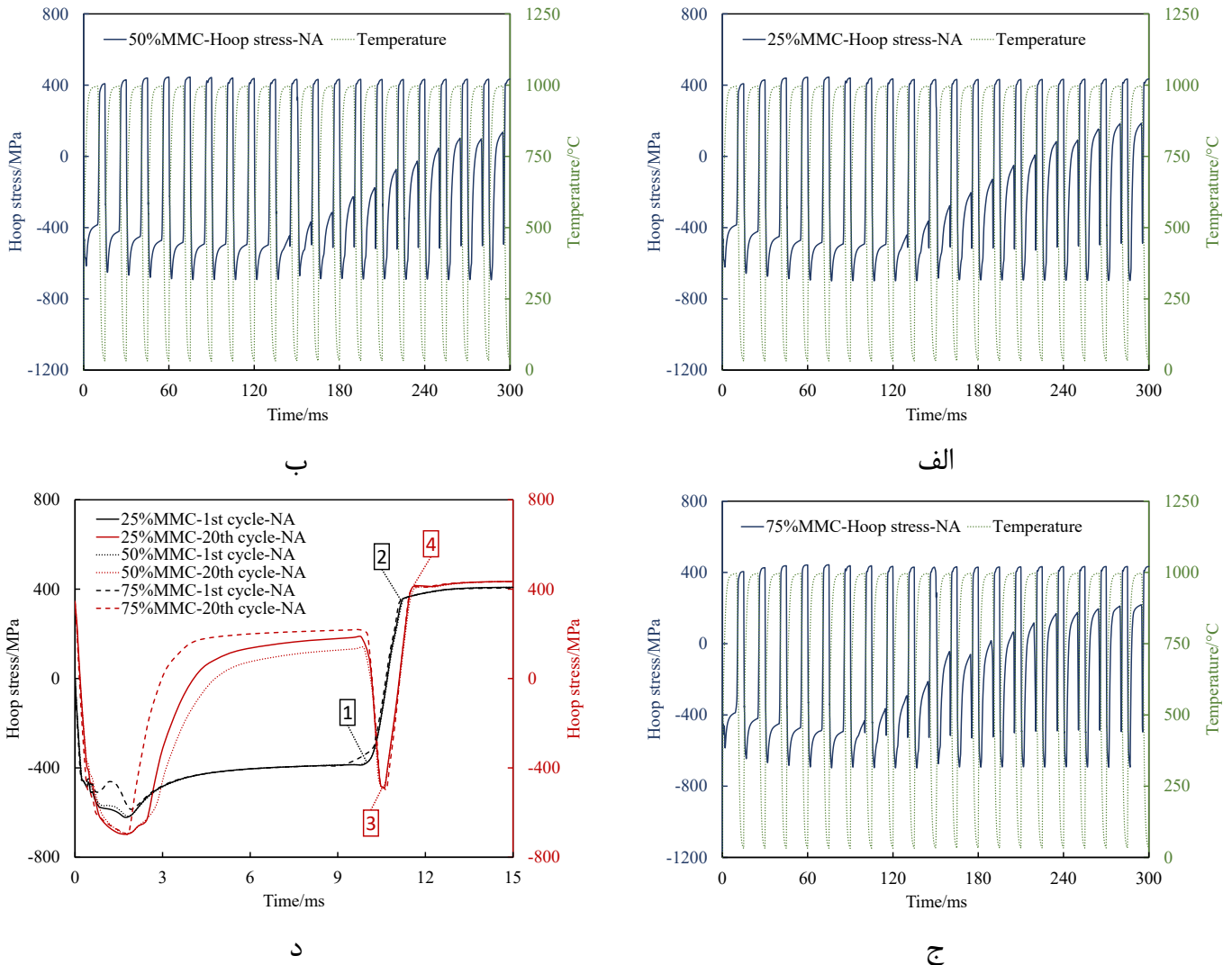
در مرحله بعدی شبیه‌سازی، تنش‌های باقیمانده از شبیه‌سازی‌های قبلی به عنوان میدان‌های از پیش تعریف شده استفاده می‌شود و بار ترمومکانیکی بر روی مدل‌های مشابه اعمال می‌شود، اما این بار شرایط تماس بین صورت‌های داخلی ترک تعریف می‌شود تا در حین فشردگی با یکدیگر همپوشانی نداشته باشند. با این حال، ترک می‌تواند در حین بارگذاری کششی باز شود. این تکنیک شبیه‌سازی به درک رفتار پیچیده ترک در حال رشد ناشی از بار خستگی حرارتی- مکانیکی هنگام تنش‌های فشاری ناشی از اتوفرتاژ کمک می‌کند. مش‌بندی عنکبوتی در نوک ترک و سطح ترک باز شده، همچنین فلوچارت انجام تحلیل‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

- 1 Qayyum
- 2 Lei
- 3 ABAQUS



شکل ۶. الف) مش‌بندی و قسمت‌های مدل استفاده شده و ب) فلوجارت انجام تحلیل‌ها

Fig. 6. a) Meshing and sections of the used model and b) the flowchart of the analysis

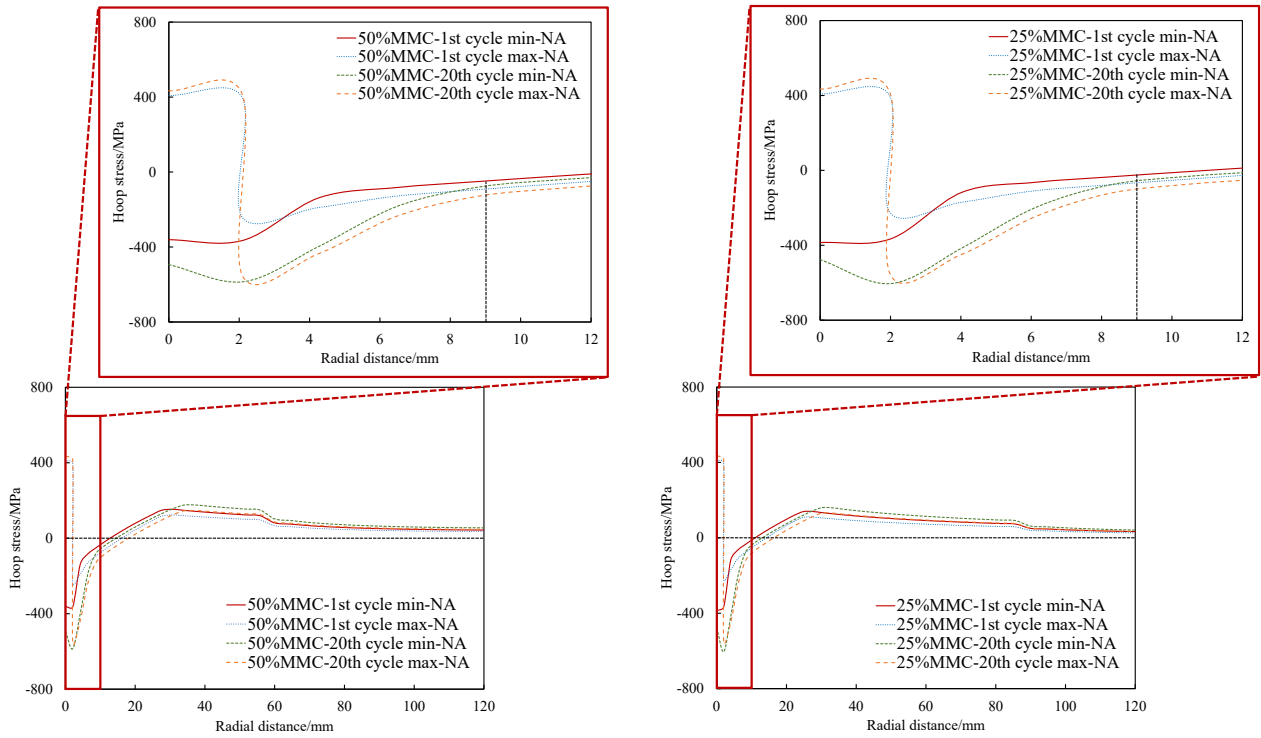


شکل ۷. تأثیر بارگذاری چرخه‌ای ترمومکانیکال بر نتایج در لوله با فولاد (الف) ۲۵٪ کامپوزیت (ب) ۵۰٪، کامپوزیت (ج) ۷۵٪ کامپوزیت و (د) چرخه اول و آخر در آنها بدون اتوفرته‌تاز

Fig. 7. The effect of thermomechanical cyclic loading in the cylinder with ST52 steel: a) 25%, b) 50%, and c) 75% of the composite ratio and d) the first and last cycles without autofrettage

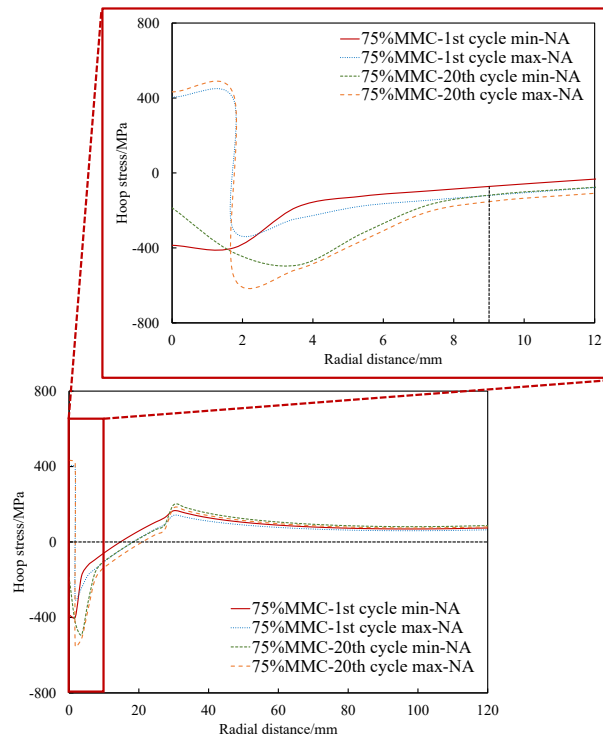
باعث ایجاد تنش‌های فشاری و کششی تا عمق ۹ میلی‌متر برای لوله با طراحی ترکیبی می‌شود. این بارگذاری چرخه‌ای و تنش محیطی مسئول ایجاد ترک‌های ریز در این ناحیه است که توسط محققان مختلف در گذشته نیز گزارش شده است [۴۱ و ۴۶]. در لوله با طراحی ترکیبی مقدار تنش محیطی تا عمق ۳۰ میلی‌متر بیشتر شده و پس از آن روند کاهشی داشته و در نسبت ۲۵ و ۵۰ درصد کامپوزیت، در شعاع مشترک، این روند کاهشی شدت بیشتری پیدا کرده تا نزدیک صفر شود ولی در نسبت ۷۵ درصد این مقدار در شعاع مشترک افزایش پیدا کرده و سپس روند کاهشی خود را ادامه می‌دهد.

تغییرات قابل توجهی نزدیک به سطح در پروفیل تنش در اولین و آخرین چرخه‌های بارگذاری مشاهده می‌شود. به دلیل گرم شدن سطح داخلی، تنش‌های فشاری وجود می‌آیند که بیشترین آنها برای لوله با طراحی ترکیبی در همه نسبت ضخامت کامپوزیت، در عمق ۲-۶ میلی‌متر است و با افزایش چرخه‌ها افزایش می‌یابد. بیشترین تنش‌های فشاری در چرخه بیستم است. نوسان تنش محیطی در سطح داخلی لوله به دلیل چرخه‌های دما و فشار اعمال شده و مشخصات شعاعی در موارد مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که چرخه حرارتی اعمال شده



ب

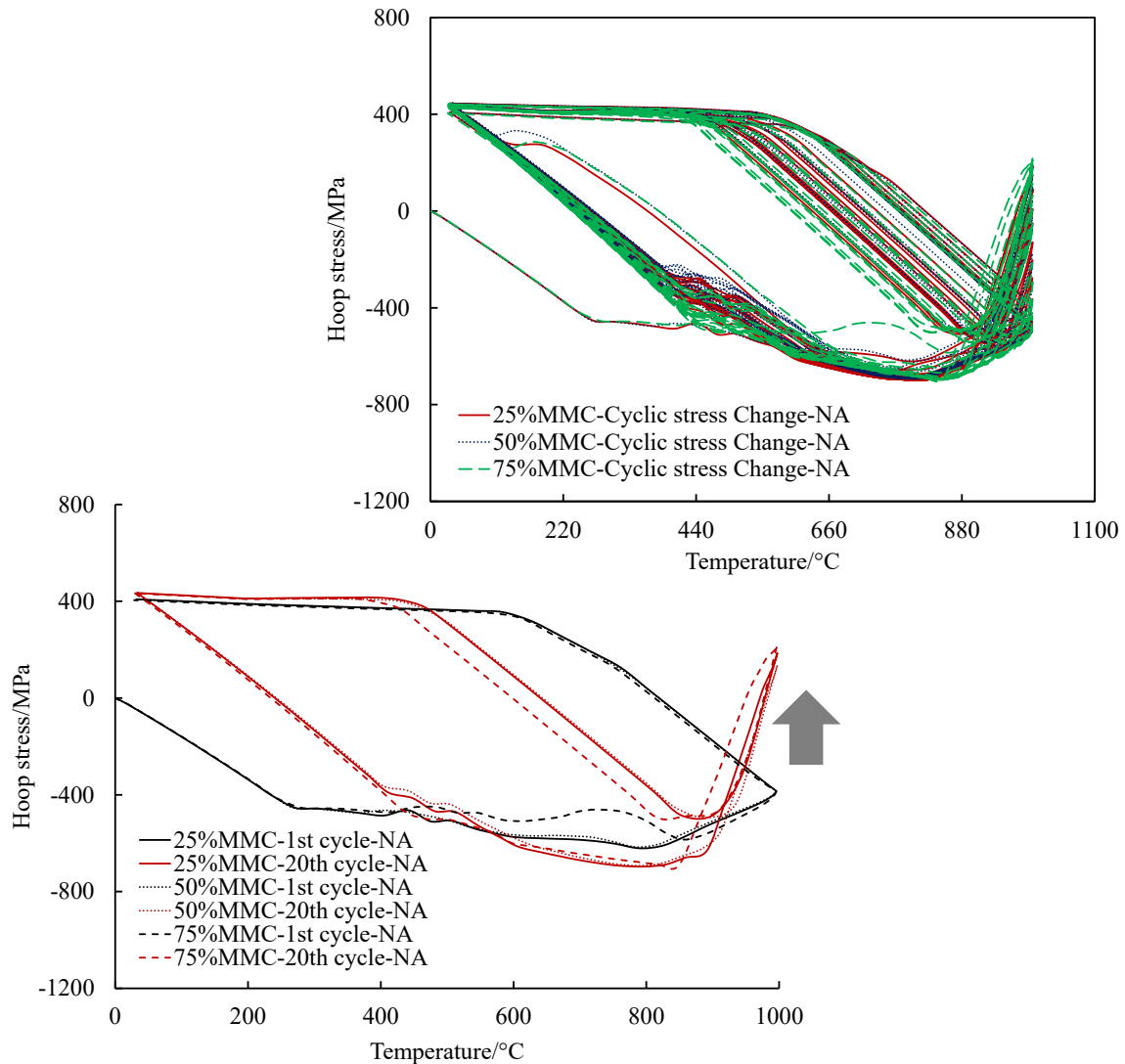
الف



ج

شکل ۸. تنش محیطی در چرخه اول و آخر در مسیر شعاعی در لوله با فولاد ST52 و الف) ۲۵٪ کامپوزیت، ب) ۵۰٪ کامپوزیت و ج) ۷۵٪ کامپوزیت بدون اتوفر تاژ

Fig. 8. The hoop stress in the first and last cycles in the radial path in the cylinder with ST52 steel: a) 25%, b) 50%, and c) 75% of the composite ratio without autofretage



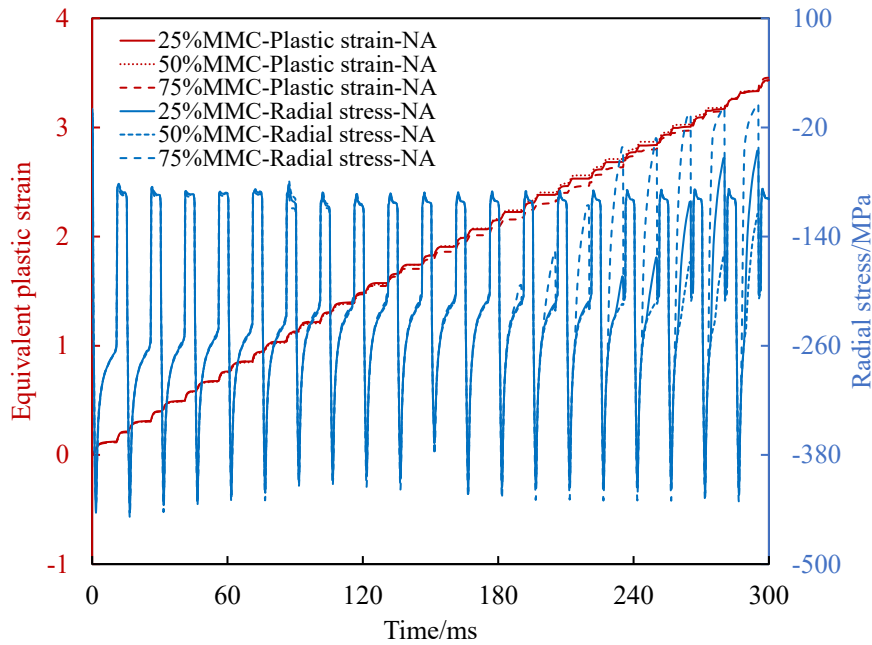
شکل ۹. نمودار هیستریزس تنش محیطی بر حسب دما در لوله با فولاد ST52 و همه حالات نسبت کامپوزیت بدون اتوفرتاژ

Fig. 9. The hysteresis diagram of the hoop stress versus the temperature in the cylinder with ST52 steel and all cases of the composite ratio without autofrettage

صفر بر نمی‌گردد و از این رو، در دمای اتاق تا ۴۳۲ مگاپاسکال برای لوله با طراحی ترکیبی در همه حالات می‌رسد. تنش کششی بعد از آن بر روی سطح داخلی لوله مسئول ایجاد ترک‌های ریز است که ممکن است بعداً رشد کرده یا منجر به ریزش و سایش مواد شود. به دلیل نرم شدن مواد توسط چرخه حرارتی - مکانیکی، نمودار پسماند باریک می‌شود، که نشان می‌دهد انرژی کمتری در هر چرخه پی در پی جذب می‌شود. این رفتار معمولاً نرم کننده چرخه‌ای، مربوط به خستگی کم چرخه است [۴۷ و ۴۸].

دما و تنش محیطی با هم برای ایجاد منحنی هیستریزس، در شکل ۹ برای لوله با طراحی ترکیبی در نسبت شعاع‌های بیان شده ترسیم شده است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در لوله بدون اتوفرتاژ، اولین چرخه حرارتی مکانیکی است که در آن بیشترین انرژی توسط مواد جذب می‌شود. تنش محیطی در ابتدا صفر است و با افزایش دما و فشار این تنش شروع به افزایش پیدا می‌کند. حداکثر آن برای لوله با طراحی ترکیبی در همه حالات در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد است.

با کاهش دما، تنش کاهش می‌یابد اما به دلیل تغییر شکل پلاستیک به



شکل ۱۰. تنش شعاعی و کرنش پلاستیک معادل برای لوله با فولاد ST52 و همه حالات نسبت کامپوزیت

Fig. 10. The radial stress and the equivalent plastic strain in the cylinder with ST52 steel and all cases of the composite ratio

۳-۲- رشد ترک در لوله بدون اتوفرتاژ

هنگامی که یک ترک در لوله وجود دارد، در ابتدا در اولین چرخه گرمایش به عنوان یک لوله بدون ترک عمل می‌کند. به دنبال آن، در طول چرخه سرمایش، تسلیم اولیه در بالاترین دما باعث ایجاد تنش‌های کششی می‌شود که ترک را باز می‌کند. چرخه دوم باعث بسته شدن ترک می‌شود (تسلیم به جلو) و سپس در چرخه سرمایش بعدی (چرخه دوم) باز شدن ترک شدیدتری مشاهده می‌شود. نمودار انتگرال \int در شکل ۱۱ نشان دهنده توسعه میدان تنش نوک ترک با افزایش طول ترک برای لوله است.

دلیل وجود نداشتن مقدار انتگرال \int برای نسبت‌های ۲۵ و ۵۰ در این است که در همان اولین چرخه مقدار آن به بینهایت رسیده و شبیه‌سازی صورت نمی‌گیرد. که نشان دهنده آنست که لوله با فولاد معمولی ST52 و کامپوزیت زمینه فلزی دارای ترک بدون اتوفرتاژ فقط در حالت نسبت قطر ۷۵ درصدی کامپوزیت قادر به تحمل تنش‌های موجود می‌باشد.

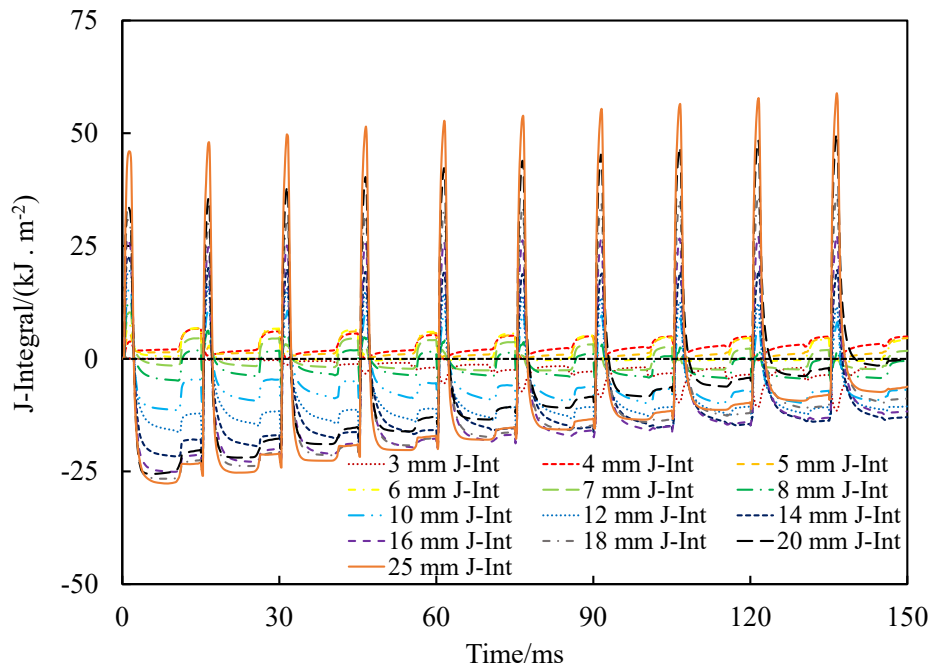
افزایش انتگرال \int در چرخه دوم در مقایسه با چرخه اول، نشان دهنده باز شدن ترک باقی مانده است. شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که انتگرال \int با افزایش طول ترک افزایش می‌یابد. میانگین پیک انتگرال \int برای هر طول ترک در شکل ۱۲ برای لوله با طراحی ترکیبی و نسبت ۷۵٪ کامپوزیت رسم

۳-۱-۲- تنش شعاعی و کرنش پلاستیک معادل آن

تنش شعاعی و کرنش پلاستیک در سطح داخلی لوله در همه حالات نیز با گذشت زمان در شکل ۱۰ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با چرخه حرارتی، مواد نرم می‌شوند و در آن حالت به دلیل بار مکانیکی اعمال شده، تغییر شکل می‌دهند.

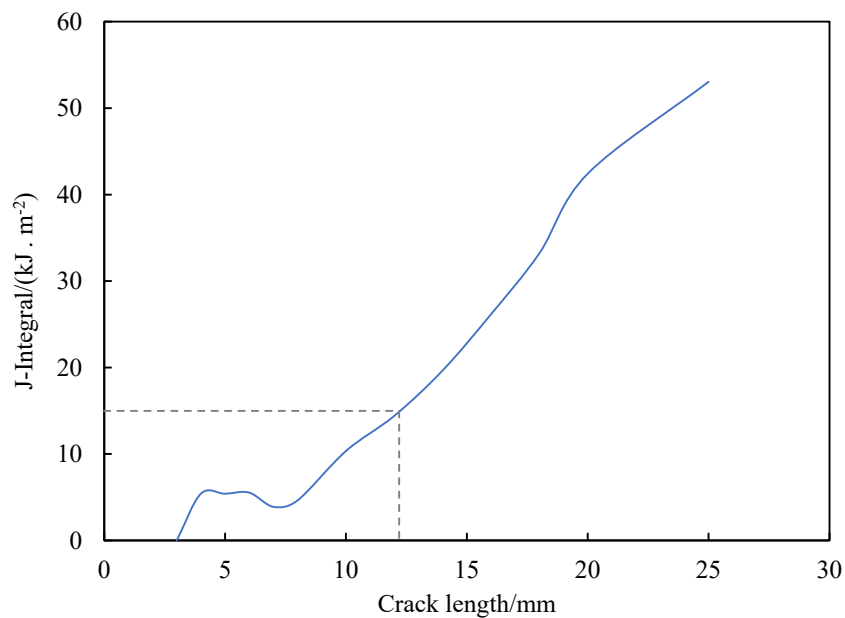
این مقدار با افزایش چرخه‌ها به دلیل نرم شدن حرارتی در سطح داخلی افزایش می‌یابد. تنش شعاعی در واقع ترکیبی از بار چرخه‌ای ترمومکانیکی و تغییر شکل پلاستیک است. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که تنش شعاعی در نسبت ۲۵ و ۵۰ درصد قطر کامپوزیت، ۴۸۸ تا ۱۶۰ مگاپاسکال فشاری باقی می‌ماند ولی در نسبت ۷۵ درصد قطر، این مقدار ۴ مگاپاسکال کششی می‌شود.

در واقع، مواد پس از رسیدن به تغییر شکل پلاستیکی دچار فرسایش و ریزش می‌شوند و سطح جدید مواد در معرض بارهای حرارتی- مکانیکی اعمال شده قرار می‌گیرد. محدودیت مدل شبیه‌سازی عددی فعلی این است که قادر به درک حذف لایه پس از رسیدن به مقدار تغییر شکل پلاستیکی خاص نیست و افزایش مداوم تغییر شکل کرنش پلاستیکی معادل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. انتگرال J در طول زمان در لوله با طراحی ترکیبی و نسبت ۷۵٪ کامپوزیت بدون اتوفرته‌تاز

Fig. 11. The J-Integral versus the time with 75% of the composite ratio in the cylinder without autofrettage



شکل ۱۲. انتگرال J بر حسب طول ترک در لوله با طراحی ترکیبی و نسبت ۷۵٪ کامپوزیت بدون اتوفرته‌تاز

Fig. 12. The J-Integral versus the crack length with 75% of the composite ratio in the cylinder without autofrettage

تنش‌های فشاری در لوله در نسبت ۲۵٪ کامپوزیت تا عمق ۴۱ میلی‌متر، برای ۵۰٪ کامپوزیت تا عمق ۴۴ میلی‌متر و برای ۷۵٪ کامپوزیت تا عمق ۲۹ میلی‌متر ادامه می‌یابد. پس از آن، لوله دارای تنش‌های کششی است که در عمق شعاع مشترک فولاد و کامپوزیت به حداکثر مقدار می‌رسد. این تجمع تنش‌های باقیمانده مسئول محدود کردن رشد ترک در داخل لوله است. تجزیه و تحلیل تا این مرحله نشان می‌دهد که اتوفرتاژ حتی ممکن است تأثیر منفی بر شروع ترک داشته باشد. با این حال، انتشار ترک تا حدی محدود می‌شود.

منحنی هیستریزس تنش و دما در لوله‌های اتوفرتاژ شده ناشی از چرخه ترمومکانیکی اعمال شده شکل ۱۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مساحت زیر چرخه اول بزرگتر است، بدین معنی که چرخه اول در لوله اتوفرتاژ شده مضرات بیشتری دارد. در اواخر چرخه، نمایه شبیه منحنی لوله بدون اتوفرتاژ می‌شود.

۳-۳-۲ کرنش پلاستیک معادل

تنش شعاعی بر روی سطح داخلی لوله در طول اتوفرتاژ و بدون آن با چرخه ترمومکانیکی در شکل ۱۶ برای لوله ترسیم شده است. تنش شعاعی در واقع ترکیبی از بار چرخه‌ای ترمومکانیکی است و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد تنش شعاعی در ابتدا بسیار فشاری است اما به دلیل چرخه حرارتی در لوله با فولاد یکپارچه به آرامی کاهش می‌یابد ولی در لوله با طراحی ترکیبی تقریباً مقدار ثابتی دارد.

کرنش پلاستیک نیز در سطح داخلی لوله در شکل ۱۶ نشان داده شده است. فشار داخلی زیاد بر روی سطح داخلی لوله در حین اتوفرتاژ باعث تغییر شکل پلاستیک می‌شود. چرخه حرارتی پس از آن به تغییر شکل پلاستیک و تجمع تغییر شکل دائمی در سطح داخلی کمک می‌کند. مشاهده می‌شود که کرنش پلاستیک ناشی از چرخه حرارتی پس از اتوفرتاژ در لوله در نسبت کامپوزیت ۲۵٪ و ۵۰٪، ۲۵ درصد و در نسبت کامپوزیت ۷۵٪، ۲۰ درصد بیشتر از مورد بدون اتوفرتاژ است که بسیار مضر است. مشخصات کرنش پلاستیکی در این شکل نشان می‌دهد که اعوجاج پلاستیکی زیاد سطح داخلی لوله بعد از اتوفرتاژ بسیار مستعد آسیب سریع حتی در اولین چرخه است. بنابراین، در بسیاری از مطالعات، پوشش‌دهی سطح داخلی لوله بعد از اتوفرتاژ پیشنهاد شده [۵۰] که نشان داده شده است به طور بالقوه از سطح داخلی در برابر آسیب محافظت می‌کند [۵۴-۵۱].

شده است و مشاهده می‌شود که افزایش انتگرال J با افزایش طول برای لوله پس از ۸ میلی‌متر طول ترک تقریباً خطی است و این واقعیت را مشخص می‌کند که ترک در لوله با افزایش مداوم هر چرخه ترمومکانیکی اعمال شده، تا خرابی افزایش می‌یابد. همانطور که مشخص شده است مقدار انتگرال J بحرانی برای فولاد ST52، 15 kJ/m^2 [۴۹] گزارش شده است.

۳-۳-۳ لوله بدون ترک با اتوفرتاژ

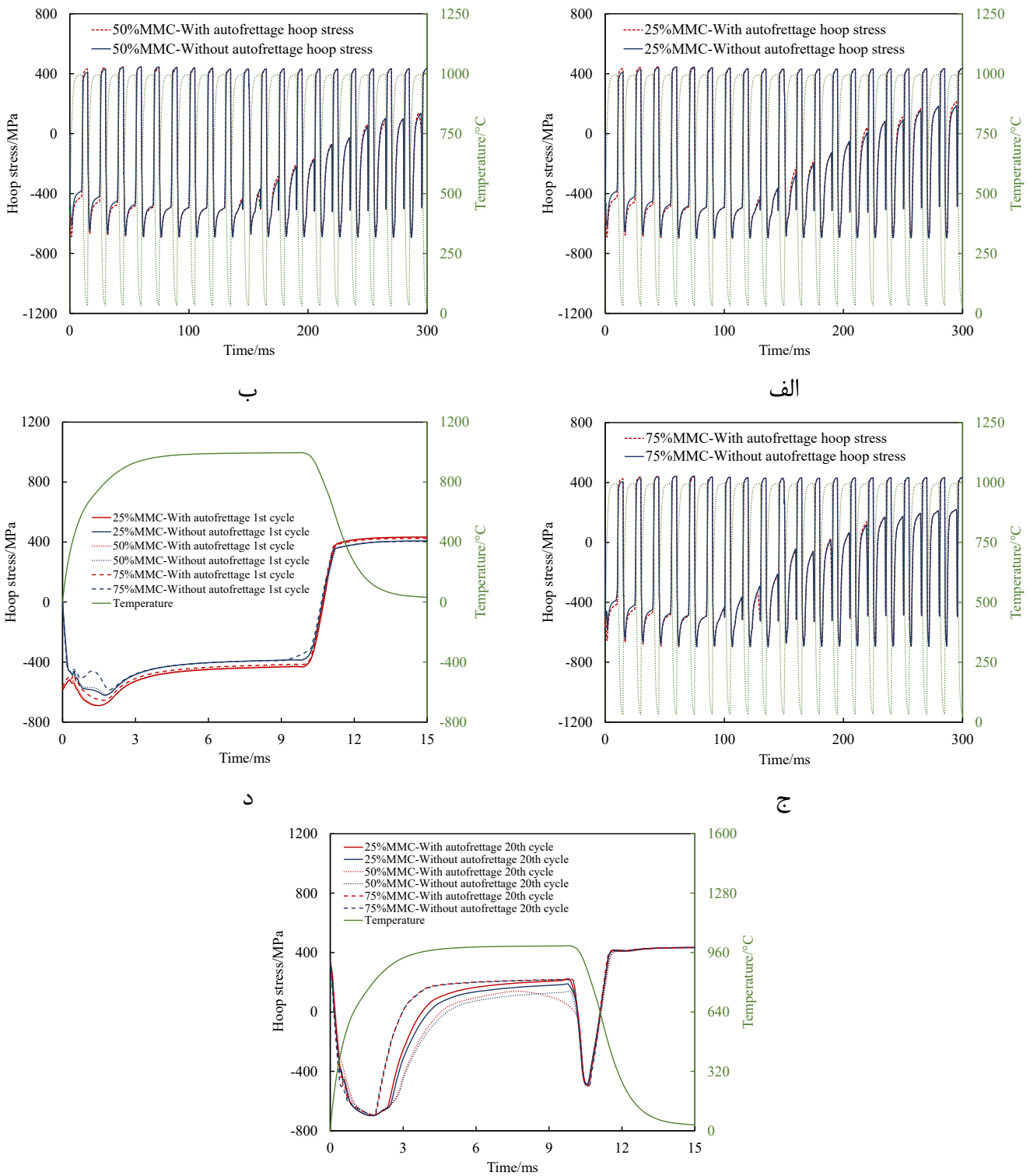
به دلیل اتوفرتاژ، سطح داخلی لوله به طور پلاستیک تغییر شکل می‌دهد و تنش‌های فشاری باقی‌مانده تجمع می‌یابد.

۳-۳-۱ تنش محیطی

شکل ۱۳، ۲۰ چرخه دمایی اعمال شده و تنش محیطی مربوطه را نشان می‌دهد. در لوله با همه نسبت درصد قطر کامپوزیت مشاهده می‌شود که تنش محیطی کششی پس از اولین چرخه حرارتی در سطح داخلی، ۴۰۰ مگاپاسکال است و در چرخه‌های حرارتی بعدی ثابت می‌ماند. همچنین تنش محیطی فشاری بر روی سطح داخلی لوله پس از اتوفرتاژ ۷۰۰ مگاپاسکال و بدون اتوفرتاژ ۶۰۰ مگاپاسکال است که در با همه نسبت درصد قطر کامپوزیت در چرخه اول به ۴۱۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد اما در چرخه‌های بعدی به آرامی افزایش می‌یابد و در چرخه آخر به مقدار ۴۹۰ مگاپاسکال می‌رسد.

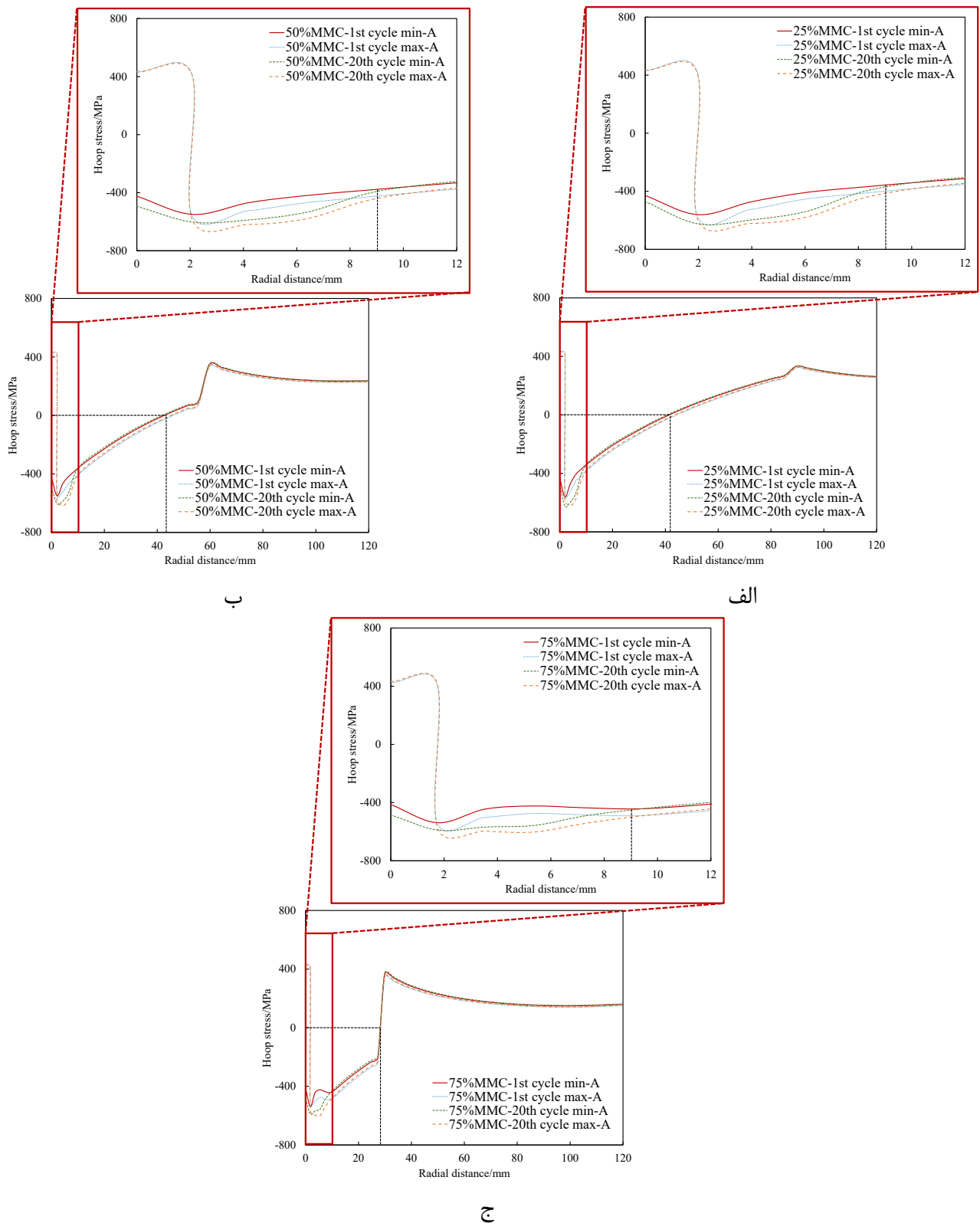
برای ارائه واضح تنش‌های پسماند بر روی سطح داخلی لوله اتوفرتاژ شده به دلیل بار چرخه‌ای ترمومکانیکی، اولین و آخرین چرخه‌ها نیز به طور جداگانه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تنش‌های فشاری بیش از حد در سطح داخلی لوله‌ها به دلیل اتوفرتاژ وجود دارند که به دلیل بار حرارتی بیش از حد کمتر شده و پس از ۳ ثانیه مانند لوله بدون اتوفرتاژ می‌شوند. این امر نشان می‌دهد که تنش‌های محیطی پسماند روی سطح، نقش چندانی در افزایش عمر ندارند.

مقدار تنش کششی و فشاری چرخه‌های ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در جدول ۲، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تنش کششی تولید شده کاهش پیدا می‌کند و تنش‌های فشاری با چرخه حرارتی مکانیکی بعدی در لوله اتوفرتاژ شده و بدون اتوفرتاژ افزایش پیدا می‌کنند. با توجه به شکل ۱۴ در لوله مشاهده می‌شود که به دلیل وجود چرخه‌های ترمومکانیکی، لوله اتوفرتاژ شده تحت بار چرخه‌ای بزرگی تا عمق ۹ میلی‌متر قرار می‌گیرد.



شکل ۱۳. تأثیر بارگذاری چرخه‌ای ترمومکانیکال بر نتایج در لوله با فولاد (الف) ۲۵٪ کامپوزیت (ب) ۵۰٪ کامپوزیت (ج) ۷۵٪ کامپوزیت، (د) چرخه اول و (ه) چرخه آخر در آنها با اتوفرتاژ و بدون اتوفرتاژ

Fig. 13. The effect of thermomechanical cyclic loading in the cylinder with ST52 steel: a) 25%, b) 50%, and c) 75% of the composite ratio, d) the first cycle with autofrettage and without autofrettage and e) the last cycle with autofrettage and without autofrettage



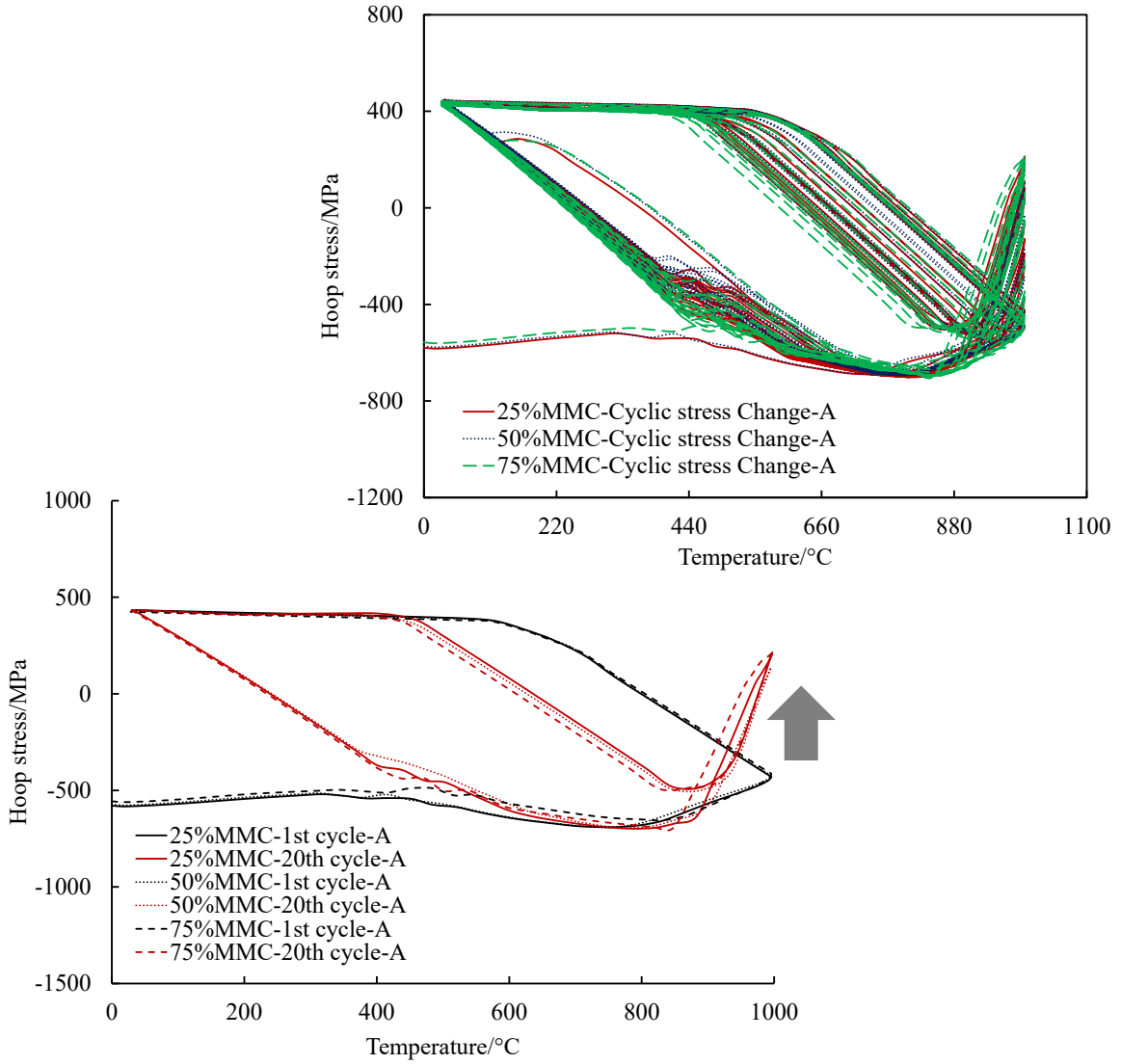
شکل ۱۴. تنش محیطی در چرخه اول و آخر در مسیر شعاعی در لوله با فولاد و الف) ۲۵٪ کامپوزیت ب) ۵۰٪ کامپوزیت ج) ۷۵٪ کامپوزیت با اتوفر تاژ

Fig. 14. The hoop stress in the first and last cycles in the radial path in the cylinder with ST52 steel: a) 25%, b) 50%, and c) 75% of the composite ratio with autofrettage

جدول ۲. مقدار تنش کششی و فشاری بر حسب MPa در چرخه‌های ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰

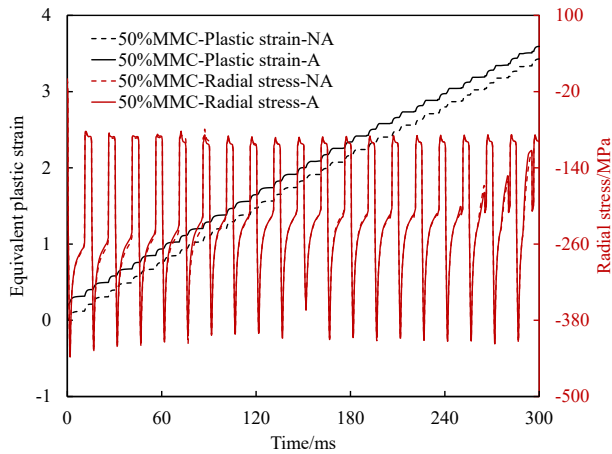
Table 2. The tensile and compressive stresses in MPa in the cycle number of 1, 5, 10, 15 and 20

با اتوفرتاژ		بدون اتوفرتاژ		چرخه	مواد لوله
کمترین (فشاری)	بیشترین (کششی)	کمترین (فشاری)	بیشترین (کششی)		
۶۹۰	۴۳۴	۶۲۱	۴۰۸	۱	ST۵۲ ۲۵% SiC/Ti-۲۴Al-۱۱Nb
۷۰۰	۴۴۰	۶۹۵	۴۴۵	۵	
۶۹۲	۴۳۲	۶۹۸	۴۳۱	۱۰	
۶۹۶	۴۳۲	۶۹۵	۴۳۲	۱۵	
۶۹۸	۴۳۴	۶۹۷	۴۳۵	۲۰	
۶۹۰	۴۳۲	۶۱۶	۴۰۹	۱	ST۵۲ ۵۰% SiC/Ti-۲۴Al-۱۱Nb
۶۹۴	۴۴۱	۶۸۷	۴۳۵	۵	
۶۸۶	۴۳۱	۶۹۰	۴۳۱	۱۰	
۶۸۹	۴۳۲	۶۸۸	۴۳۲	۱۵	
۶۹۴	۴۳۳	۶۹۳	۴۳۳	۲۰	
۶۵۵	۴۲۵	۵۸۵	۴۰۵	۱	ST۵۲ ۷۵% SiC/Ti-۲۴Al-۱۱Nb
۶۹۹	۴۳۸	۶۹۳	۴۳۱	۵	
۶۹۳	۴۲۹	۶۹۸	۴۲۹	۱۰	
۶۹۲	۴۳۲	۶۹۱	۴۳۲	۱۵	
۶۹۳	۴۳۳	۶۹۳	۴۳۳	۲۰	

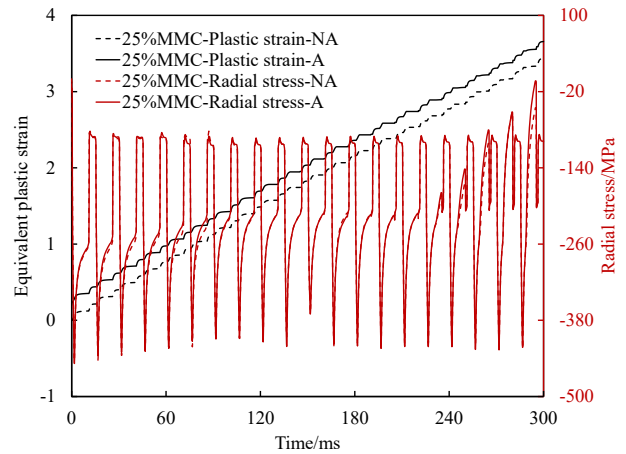


شکل ۱۵. نمودار هیستریزس تنش محیطی بر حسب دما در لوله با فولاد ST52 و همه حالات نسبت کامپوزیت با اتوفر تاژ

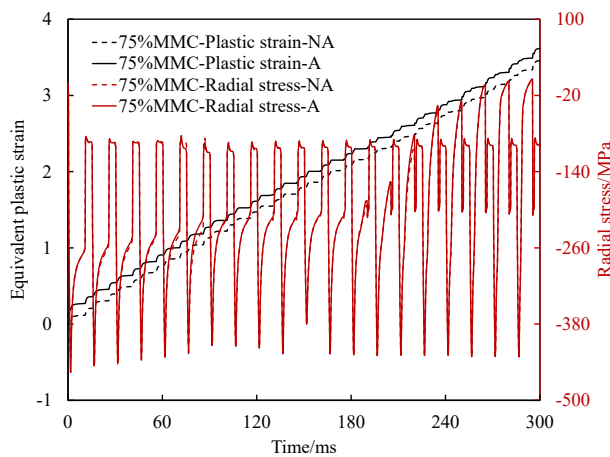
Fig. 15. The hysteresis diagram of the hoop stress versus the temperature in the cylinder with ST52 steel and all cases of the composite ratio with autofrettage



ب



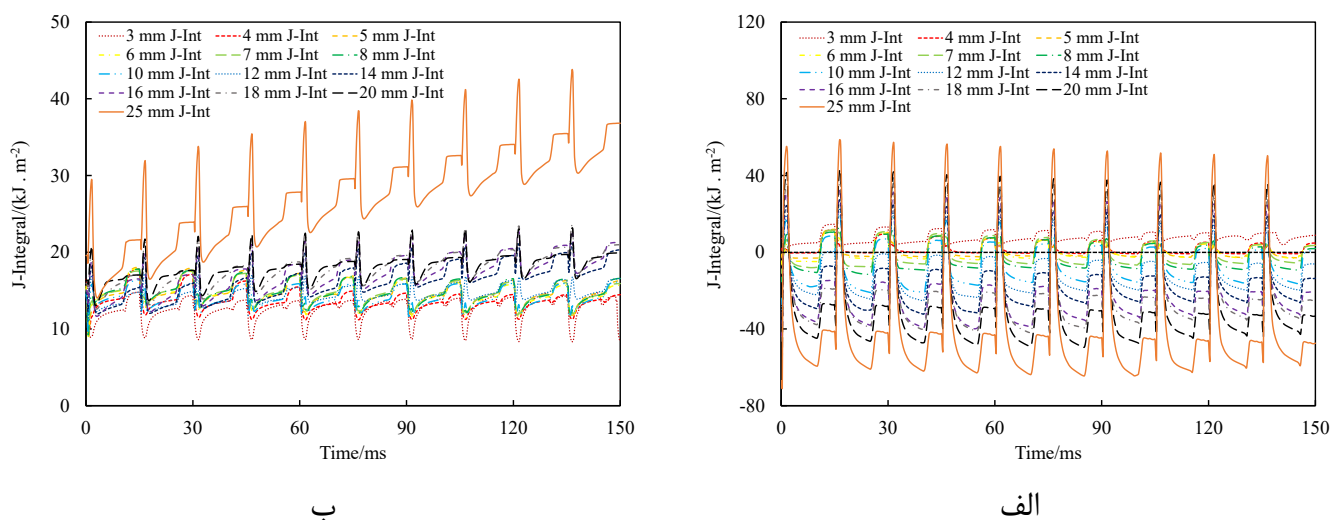
الف



ج

شکل ۱۶. تنش شعاعی و کرنش پلاستیک معادل در بارگذاری چرخه‌ای حرارتی - مکانیکی برای لوله با فولاد و الف) ۲۵٪ کامپوزیت (ب) ۵۰٪ کامپوزیت و ج) ۷۵٪ کامپوزیت با اتوفرتاژ و بدون اتوفرتاژ

Fig. 16- The radial stress and the equivalent plastic strain in autofrettaged and non-autofrettaged cylinders with ST52 steel: a) 25%, b) 50%, and c) 75% of the composite ratio



شکل ۱۷. انتگرال J در طول زمان در لوله با طراحی ترکیبی و الف) نسبت ۵۰٪ کامپوزیت و ب) نسبت ۷۵٪ کامپوزیت با اتوفرتاژ

Fig. 17. The J-Integral versus the time with a) 50% and b) 75% of the composite ratio in the cylinder with autofrettage

انتگرال J برای هر طول ترک در شکل ۱۸ برای لوله رسم شده است و مشاهده می‌شود که در لوله با نسبت ۵۰٪ کامپوزیت، مقدار انتگرال J برای چرخه اول تا ۱۰ میلی‌متر طول ترک ثابت است و پس از آن به طور خطی با افزایش طول ترک افزایش می‌یابد. و این موضوع برای چرخه دهم نیز با مقدار کمتر اتفاق می‌افتد. در لوله با طراحی ترکیبی با نسبت ۷۵٪ کامپوزیت، مقدار انتگرال J برای چرخه اول تا ۱۰ میلی‌متر طول ترک ثابت است و پس از آن به طور نمایی با افزایش طول ترک افزایش می‌یابد. و این موضوع برای چرخه دهم نیز با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد.

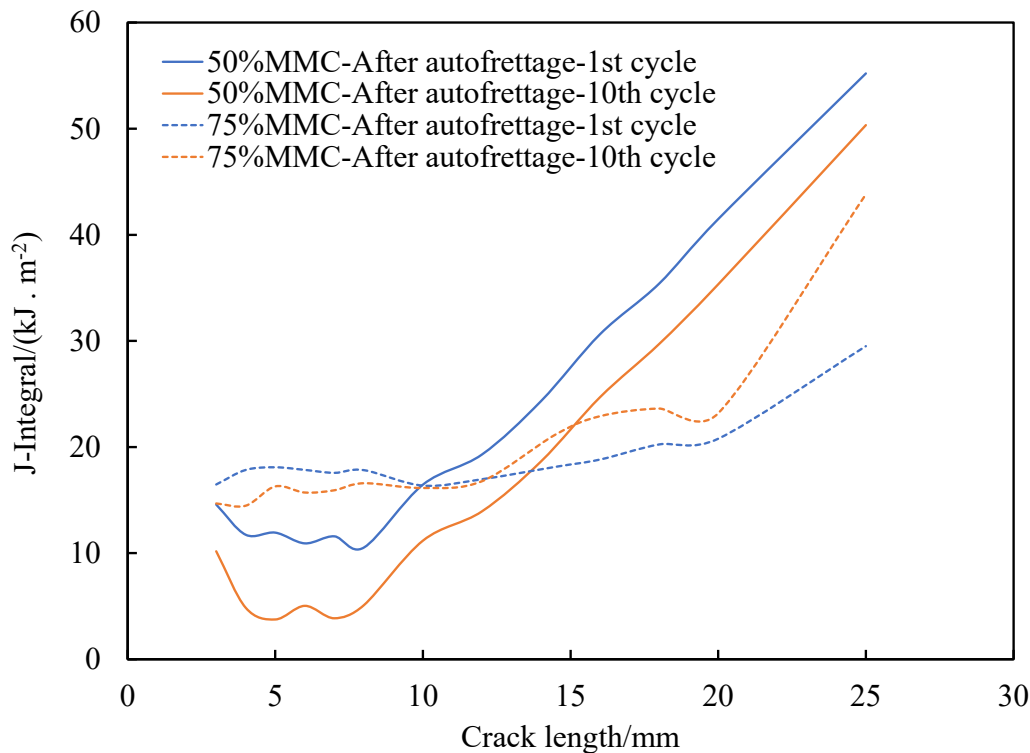
۳-۵- نتایج

به طور کلی از اتوفرتاژ برای ایجاد تنش‌های محیطی فشاری (پسماند) در داخل لوله‌های جدارضخیم برای بهبود عمر خستگی آنها در حین کار استفاده می‌شود. اگرچه این علم مدت‌هاست که شناخته شده است و بسیاری از محققان بر روی بهبود یکپارچگی لوله‌های جدارضخیم ساخته شده از مواد مختلف کار کرده‌اند [۵۰ و ۵۶] و مدل‌هایی را برای برآورد مطلوب فشارهای بارگذاری و باربرداری اتوفرتاژ [۵۲ و ۵۷] ایجاد کرده‌اند. چالش مهمتر هنوز در درک عمر مفید این لوله‌های جدارضخیم اتوفرتاژ شده تحت چرخه‌های بارگذاری حرارتی و مکانیکی پیچیده است، یعنی در مورد لوله‌های سلاح که مطالعه آن پیچیده است.

۳-۴- لوله با ترک و با اتوفرتاژ

کانتور انتگرال J در شکل ۱۷ نشان دهنده توسعه میدان تنش نوک ترک با افزایش طول ترک در لوله‌های اتوفرتاژ شده می‌باشد. از نمودار مشخص است که حالت پایدار طول ترک در لوله با طراحی ترکیبی در همه طول ترک‌ها علاوه بر بار فشاری روی ترک در نسبت ۵۰٪ کامپوزیت، بار کششی نیز وجود دارد و مقدار آن از نسبت ۷۵٪ کامپوزیت که خود فقط بار کششی دارد بیشتر بوده و تقریباً کمی بیشتر از لوله با نسبت ۷۵٪ بدون اتوفرتاژ نیز است. لازم به ذکر است که با فرآیند اتوفرتاژ می‌توان از نسبت کامپوزیت ۵۰٪ نیز استفاده کرد.

مقدار منفی انتگرال J معمولاً در شبیه‌سازی عددی به دلیل شرایط شکل‌پذیری چرخه‌ای کاملاً معکوس ایجاد شده در نوک ترک ظاهر می‌شود. این ویژگی خاصی از انتگرال چرخه‌ای J است. در طول چرخه بارگذاری، مواد به طور پلاستیکی در جهت کشش تغییر شکل می‌دهند. با این حال، هنگامی که مواد آزاد می‌شوند، حتی اگر تنش‌های میدان کششی باقی بمانند، می‌توانیم یک فشرده‌سازی پلاستیکی باقی‌مانده را در نوک ترک پیدا کنیم. این در طول شبیه‌سازی به عنوان مقدار منفی انتگرال J نشان داده می‌شود. باید در نظر داشت که این کار واقعی در نوک ترک انجام شده است و نباید نادیده گرفته شود. علاوه بر این، بزرگی ΔJ عامل محرک رشد ترک محسوب می‌شود. که در سایر تحقیقات [۵۵] در این باره توضیحات ارائه شده است.



شکل ۱۸. انتگرال J بر حسب طول ترک در لوله با طراحی ترکیبی با نسبت ۷۵٪ و ۵۰٪ کامپوزیت با اتوفرتاژ

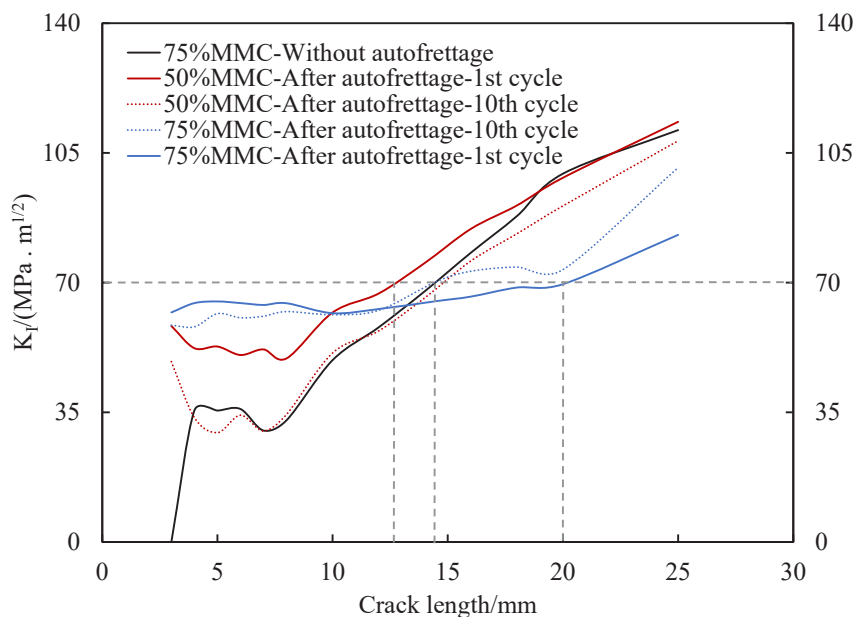
Fig. 18. The J-Integral versus the crack length with a) 50% and b) 75% of the composite ratio in the cylinder with autofrettage

اتوفرتاژ شده به سمت افزایش تنش فشاری در لوله دارای ترک نیست، که ممکن است تا حدی ناشی از گرمایش باقی مانده از چرخه ترمومکانیکی قبلی باشد، اما منجر به اثر نرم شدن سطح لوله می‌شود. این به عنوان کاهش سختی سطح داخلی لوله ظاهر می‌شود. همچنین حداکثر تنش ناشی از چرخه ترمومکانیکی تا عمق ۹ میلی‌متر در لوله است و پس از آن تغییرات پس از شعاع مشترک فولاد و کامپوزیت حداقل می‌شود. این عمق فعال برای شروع ترک است. در عمل، توسط سایر محققان مشاهده شده است که در هنگام شلیک، فرسایش لوله نیز نزدیک به عمق ۸ میلی‌متری در لوله‌ها با هندسه‌های مشابه اتفاق می‌افتد [۵۸].

تنش کششی بسیار بالا نیز پس از چرخه اول مشاهده می‌شود. از طریق مطالعات مختلف مشخص شده است که چرخه اول بارگذاری خستگی حرارتی مضرترین چرخه است، مانند ادین و همکاران [۵۹]، که آزمایشی را روی پیستون‌های موتور انجام دادند تا مشخص شود که چرخه اول بیشترین آسیب را دارد. بنابراین، پیش گرم کردن لوله سلاح قبل از اولین آتش نیز معمول است.

در این پژوهش، یک مطالعه دقیق با شبیه‌سازی عددی لوله سلاح ترک خورده و بدون ترک برای ۲۰ چرخه ترمومکانیکی انجام شده است. مدل عددی شامل مکانیک ترک حرارتی، مکانیکی و خستگی است. مواد مورد مطالعه، با فولاد ST۵۲ و کامپوزیت زمینه فلزی SiC/Ti-۲۴Al-۱۱Nb است. شرایط مرزی اعمال شده مشابه لوله سلاح در هنگام شلیک می‌باشد. چهار شرط تنش در این مطالعه در دمای ۲۵-۹۵۰ درجه سانتیگراد و فشار ۴۰۰-۱۰۰ مگاپاسکال در طول چرخه بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است.

- اول بارگذاری ترمومکانیکی بدون اتوفرتاژ و بدون ترک.
 - دوم بارگذاری ترمومکانیکی با اتوفرتاژ بدون ترک.
 - سوم بارگذاری ترمومکانیکی در لوله دارای ترک بدون اتوفرتاژ با افزایش طول ترک
 - چهارم بارگذاری ترمومکانیکی در لوله اتوفرتاژ شده دارای ترک با افزایش طول ترک
- مشاهده گردید که گرایش کلی بارگذاری چرخه‌ای ترمومکانیکی در لوله



شکل ۱۹. مقایسه ضریب شدت تنش بر حسب طول برای لوله با طراحی ترکیبی با نسبت ۷۵٪ و ۵۰٪ کامپوزیت اتوفرتاژ شده و بدون اتوفرتاژ

Fig. 19. The comparison of the stress intensity factor versus the length in autofrettaged and non-autofrettaged cylinders with the composite ratio of 50% and 75%

در چرخه ترمومکانیکی بیستم، تنش کششی در لوله ثابت می‌ماند. همچنین مقدار انتگرال J در همه حالات در لوله مقادیر مثبتی دارد که از یکسان بودن تنش کششی در همه چرخه‌ها نشأت می‌گیرد و رشد ترک وجود خواهد داشت.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل شبیه‌سازی عددی چند فیزیکی برای تجزیه و تحلیل تأثیر طول ترک در طول عمر خستگی لوله سلاح اتوفرتاژ شده و بدون اتوفرتاژ در حین کارکرد، با خواص مواد پلاستیک الاستیک با درجه حرارت بالا مربوط فولاد ST52 به همراه کامپوزیت پایه فلزی $SiC/Ti-24Al-1Nb$ در نسبت قطرهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد به یکدیگر، مطالعه گردید. مدل شبیه‌سازی عددی در شرایط کرنش صفحه‌ای با اعمال چرخه ترمومکانیکی که یک لوله سلاح واقعی در حال شلیک مداوم تحت آن قرار می‌گیرد، انجام شد. نتایج به تفصیل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و با یکدیگر مقایسه شد تا بینش بهتری در مورد عوامل ایجاد خرابی لوله سلاح ایجاد شود. این مطالعه همچنین به تحلیل رفتار شروع و رشد ترک در شرایط پیچیده بارگذاری در طول عمر مفید لوله سلاح کمک کرد.

در لوله ترک‌دار بدون اتوفرتاژ به دلیل چرخه ترمومکانیکی و همچنین نرم شدن مواد جلوتر از نوک ترک، کاهش مقدار انتگرال J با چرخه حرارتی مشاهده می‌شود. مقایسه ضریب شدت تنش (K_I) محاسبه شده لوله اتوفرتاژ شده و بدون اتوفرتاژ با طول ترک متفاوت در شکل ۱۹ نشان داده شده است. با این حال، باید توجه داشت که در مقدار K_I بیش از K_{IC} ($MPa.m^{1/2}$) ۷۰ [۶۰ و ۶۱] برای لوله طراحی ترکیبی با نسبت ۵۰٪ کامپوزیت اگر طول ترک به ۱۳ میلی‌متر در چرخه اول و ۱۴ میلی‌متر در چرخه دهم برسد و همچنین مقدار ۱۴ میلی‌متر برای لوله طراحی ترکیبی با نسبت ۷۵٪ کامپوزیت برای چرخه اول و بدون عملیات اتوفرتاژ و مقدار ۲۰ میلی‌متر برای چرخه اول با عملیات اتوفرتاژ برسد، لوله احتمالاً منفجر می‌شود.

به دلیل اتوفرتاژ، سطح داخلی لوله به طور پلاستیکی تغییر شکل می‌دهد و تنش‌های فشاری باقی‌مانده تا عمق معینی وجود دارند (شکل ۵ و شکل ۶). مقدار تنش محیطی فشاری پسماند در لوله، نزدیک به ۵۱۵، ۵۲۵ و ۵۳۵ مگاپاسکال برای درصدهای ذکر شده کامپوزیت است. همانطور که در شکل ۱۳ و جدول ۲ نشان داده شده است، در سطح داخلی، تنش محیطی کششی در همه حالات لوله با طراحی ترکیبی اتوفرتاژ نشده در حدود ۴۱۰ مگاپاسکال در مقایسه با حدود ۴۳۵ مگاپاسکال در لوله اتوفرتاژ شده است.

- 100(4) (1978) 374 -381.
- [3] P. Chen, Bauschinger and hardening effect on residual stresses in an autofrettaged thick-walled cylinder, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 108 (1986) 108-112.
- [4] Z. Xiaoying, L. Gangling, Autofretted calculative method of a thick-walled cylinder for the open-ended case, in: *Fifth International Conference on Pressure Vessel Technology*, 1 (1984) 85-95.
- [5] J. Yang, R. Zhu, Autofrettage of thick cylinders, *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 75 (1998) 443-446.
- [6] G.S. Wang, An elastic-plastic solution for a normally loaded center hole in a finite circular body, *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 33 (1988) 269-284.
- [7] G. Xinlin, W. Xuexia, An elasto-plastic analytical solution for a closed-end thick-walled cylinder of a strain-hardening material, *Petro-Chemical Equipment Technology*, 20(6) (1991) 37-40.
- [8] G. Xinlin, An exact elasto-plastic solution for an opened-end thick-walled cylinder of a strain-hardening material, *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 5(1) (1992) 129-144.
- [9] G. Wanlin, Elastic-plastic analysis of a finite sheet with a cold-worked hole, *Engineering Fracture Mechanics*, 45(6) (1993) 857-864.
- [10] G. Clark, Fatigue Crack Growth Through Residual Stress Field-Theoretical and Experimental Studies on Thick-Walled Cylinders, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2 (1984) 111-125.
- [11] M. Perl, Stress Intensity Factor Approximate Formulae for Uniform Crack Arrays in Pressurized or Autofrettaged Cylinders, *Engineering Fracture Mechanics*, 43(5) (1992) 725-732.
- [12] L. Yong, The Axial Stress Intensity Factors in Autofrettaged Cylinders with External Hoop Cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, 42(2) (1992) 265-271.
- [13] H.M. Shu, J. Petit, G. Bezzine, Stress Intensity Factors for Radial Cracks in Thick-Walled Cylinders-II, Combination of Autofrettage and Internal Pressure,

از این مطالعه این نتایج حاصل شد:

- اتوفرتاژ عملاً سطح داخلی لوله را در شرایط شدید عملکردی که تجربه می‌کند مقاوم نمی‌کند. مشاهده شد که دامنه تنش در سطح، حتی افزایش می‌یابد. با این حال، اتوفرتاژ باعث ایجاد تنش فشاری باقی‌مانده نه تنها روی سطح بلکه قسمت عمده لوله می‌شود.
- لوله فقط در حالت ۷۵ درصد نسبت کامپوزیت بدون ترک قادر به تحمل شرایط شلیک در حالت بدون اتوفرتاژ است، درحالی که در حالت با اتوفرتاژ علاوه بر این نسبت، مقدار ۵۰ درصد نسبت هم قادر به تحمل شرایط می‌باشد. ۲۵ درصد نسبت کامپوزیت نیز فقط در حالت بدون ترک قادر به تحمل شرایط است.
- این فشرده‌سازی باقی‌مانده نقش مهمی در نوک ترک ایفا می‌کند و رشد ترک را محدود می‌کند. مشاهده شد که تا عمق ۹ میلی‌متر برای فولاد ST۵۲ و کامپوزیت پایه فلزی، اتوفرتاژ تأثیر به‌سزایی در افزایش عمر لوله دارد.
- در لوله، رشد ترک در ۷۵ درصد نسبت کامپوزیت، در اتوفرتاژ به نصف حالت بدون اتوفرتاژ تقلیل می‌یابد. ولی در ۵۰ درصد نسبت کامپوزیت در اتوفرتاژ، مقدار رشد بیشتر از نسبت ۷۵ درصد کامپوزیت بدون اتوفرتاژ است.
- اگر در اثر فرسایش، ترک‌هایی در سطح داخلی ظاهر می‌شوند، به دلیل نرم شدن حرارتی و مقدار بسیار زیاد تنش در نوک ترک در حین شلیک، ترک‌ها می‌توانند رشد کنند و فقط مقدار آن نسبت به حالت بدون اتوفرتاژ کمتر می‌شود.
- پس از اتوفرتاژ، تنش‌های شعاعی در درجه اول تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند. با این حال، کرنش پلاستیک در مواد در حین کارکرد تسریع می‌شود. این موضوع بر نرم شدن مواد تأثیر می‌گذارد که یک اثر منفی از فرآیند اتوفرتاژ است.
- مدل و روش توسعه یافته می‌تواند برای تجزیه و تحلیل پدیده‌های پیچیده مورد استفاده قرار گرفته و مفید واقع شود.

منابع

- [1] S. Sheads, A. Luns, Rodman: Last of the Seacoast Muzzle-Loaders, *Cultural Resource Management*, 20(14) (1997) 6-17.
- [2] W.R.D. Manning, Bursting pressure as the basis for cylinder design, *Journal of Pressure Vessel Technology*,

- cooling regime on mechanical properties of high-strength low-alloy steel, *Fire and Materials*, 40, (2016) 926–939.
- [26] P.K. Brindley, S.L. Draper, J.I. Eldridge, M.V. Nathal, S.M. Arnold, The effect of temperature on the deformation and fracture of SiC/Ti-24Al-11Nb, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 23 (1992) 2527-2540.
- [27] P.K. Wright, Measurement of Residual Stresses in Metal Matrix Composites, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 116(3) (1994) 605–610.
- [28] N. Milosevic, I. Aleksic, Thermophysical properties of solid phase Ti-6Al-4V alloy over a wide temperature range, *International Journal of Materials Research*, 103(6) (2012) 707-714.
- [29] M. Seif, T. McAllister, Stability of wide flange structural steel columns at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, 84 (2013) 17-26.
- [30] A. Rahman, R. Hawileh, M. Mahamid, The Effect of Fire Loading on A Steel Frame and Connection, 76 (2004) 307-316.
- [31] W. Yuhan, J. Lianguang, L. Xuefeng, Investigation on Behavior of Castellated Composite Beams under Fire, *MATEC Web of Conferences* 175 (2018) 02032.
- [32] U.S. Dixit, R. Shufen, Finite element method modeling of hydraulic and thermal autofrettage processes, *Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques*, (2020) 31-69.
- [33] A. Mishra, A. Hameed, B. Lawton, A novel scheme for computing gun barrel temperature history and its experimental validation, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 132(6) (2010) 061202.
- [34] M. Ullah, R.A. Pasha, G.Y. Chohan, F. Qayyum, Numerical simulation and experimental verification of CMOD in CT specimens of TIG welded AA2219-T87, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(3) (2015) 935-944.
- [35] W. Asghar, M.A. Nasir, F. Qayyum, M. Shah, M. Azeem, S. Nauman, S. Khushnood, Investigation of fatigue crack growth rate in CARALL, ARALL and Engineering Fracture Mechanics, 49(4) (1994) 625-629.
- [14] L. Zhu, X.Y. Tao, L. Cengdian, Fatigue Strength and Crack Propagation Life of In-Service High Pressure Tubular Reactor under Residual Stress, *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 75 (1998) 871–877.
- [15] A. Musani, Sound Advice, A10052, INTERNATIONAL DEFENSIVE PISTOL ASSOCIATION TACTICAL JOURNAL, USA, 2003.
- [16] Department of Defense, Design Criteria Standard, Noise Limits, MILITARY STANDARD: DESIGN CRITERIA STANDARD, NOISE LIMITS 1474D, (1997).
- [17] Firehole Consulting Services, Analysis of M4-A1 Integral Suppressed Weapon Barrel, Case Study, <http://www.firehole.com/>, USA, 2009.
- [18] A. Littlefield, E. Hyland, Development and Testing of Prestressed Carbon Fiber Composite Overwrapped Gun Tubes, in: 7th International Conference on Composite Materials At: Edinburgh, Scotland, July (2009).
- [19] A. Littlefield, E. Hyland, A. Andalora, N. Klein, R. Langone, R. Becker, Carbon Fiber/Thermoplastic Overwrapped Gun Tube, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 128 (2006) 257-262.
- [20] J. Tzeng, Dynamic Fracture of Composite Overwrap Cylinders, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19(1) (2000) 2-14.
- [21] T.L. Anderson, *Fracture Mechanics-Fundamentals and Applications*, Second Edition, Texas: CRC Press LLC, (1995).
- [22] O. Wheeler, Spectrum loading and crack growth, *Journal of Basic Engineering Transaction, ASME, Series D* 94(1) (1972).
- [23] D. Broek, *The practical use of fracture mechanics*, FractuREsearch Inc., Galena, OH, USA, (1988).
- [24] R.S. Salzar, Influence of autofrettage on metal matrix composite reinforced gun barrels, *Composites Part B: Engineering*, 30(8) (1999) 841-847.
- [25] E.M. Aziz, V.K. Kodur, Effect of temperature and

- 307-319.
- [45] C. Amadio, C. Bedon, M. Fasan, Numerical assessment of slab interaction effects on the behavior of steel-concrete composite joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 139 (2017) 397-409.
- [46] F. Szmytka, M. Salem, F. Rezai-Aria, A. Oudin, Thermal fatigue analysis of automotive Diesel piston: experimental procedure and numerical protocol, *International Journal of Fatigue*, 73 (2015) 48-57.
- [47] A. Oudin, Thermo-mechanical fatigue of hot work tool steels, PhD ENSMP, dissertation these realized in Ecole Des Moines d'Albi, (2001).
- [48] Z. Zhang, G. Bernhart, D. Delagnes, Cyclic behavior constitutive modelling of a tempered martensitic steel including ageing effect, *International Journal of Fatigue*, 30(4) (2008) 706-716.
- [49] V. Scarabeli Barbosa, C. Ruggieri, Fracture Toughness Testing of a Low Alloy Structural Steel Using Non-Standard Bend Specimens and an Exploratory Application to Determine the Reference Temperature, T_0 , in: Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. Volume 5: High-Pressure Technology; ASME Nondestructive Evaluation, Diagnosis and Prognosis Division (NDPD); SPC Track for Senate. Waikoloa, Hawaii, USA. July (2017) 16–20.
- [50] J. Underwood, G. Vigilante, C. Mulligan, Review of thermo-mechanical cracking and wear mechanisms in large caliber guns, *Wear*, 263(7-12) (2007) 1616-1621.
- [51] R.V. Mises, *Mechanik der festen Keorper im plastisch-deformablen Zustand*. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Gottingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 1913 (1913) 582-592.
- [52] A. Mishra, A. Hameed, B. Lawton, A novel scheme for computing gun barrel temperature history and its experimental validation, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 132(6) (2010) 061202.
- [53] M. Ullah, R.A. Pasha, G.Y. Chohan, F. Qayyum, Numerical simulation and experimental verification of GLARE, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(7) (2017) 10861100.
- [36] F. Mukhtar, F. Qayyum, H. Elahi, M. Shah, Studying the effect of thermal fatigue on multiple cracks propagating in an SS316L thin flange on a shaft specimen using a Multiphysics numerical simulation model, *Journal of Mechanical Engineering*, 65(10) (2019) 565-573.
- [37] A.P. Parker, Autofrettage of Open-End Tubes— Pressures, Stresses, Strains, and Code Comparisons, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 123(3) (2001) 271–281.
- [38] D. Klobcar, J. Tusek, B. Taljat, Thermal fatigue of materials for die-casting tooling, *Materials Science and Engineering A*, 472(1-2) (2008) 198-207.
- [39] R.N. Katz, L.A. Bracamonte, J.C. Withers, S. Chaudhury, Hybrid Ceramic Matrix/Metal Matrix Composite Gun Barrels, *Materials and Manufacturing Processes*, 21(6) (2006) 579-583.
- [40] R. Zhu, J. Yang, Autofrettage of thick cylinders, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75(6) (1998) 443-446.
- [41] F. Qayyum, M. Shah, O. Shakeel, F. Mukhtar, M. Salem, F. Rezai-Aria, Numerical simulation of thermal fatigue behavior in a cracked disc of AISI H-11 tool steel, *Engineering Failure Analysis*, 62 (2016) 242-253.
- [42] Y. Lei, N.P. O'dowd, G.A. Webster, Fracture mechanics analysis of a crack in a residual stress field, *International Journal of Fracture*, 106(3) (2000) 195-216.
- [43] M. Shah, M. Ali, A. Sultan, M. Mujahid, H. Mehmood, N. Ullah, M. Shuaib, An investigation into the fatigue crack growth rate of electron beam-welded H13 tool steel: effect of welding and post-weld heat treatment, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 3(2) (2014) 114-125.
- [44] M. Shah, C. Mabru, F. Rezai-Aria, I. Souki, R.A. Pasha, An estimation of stress intensity factor in a clamped SE (T) specimen through numerical simulation and experimental verification: case of FCGR of AISI H11 tool steel, *Acta Metallurgica Sinica*, 25(4) (2012)

- (2004) 992-998.
- [58] L. Xiaolong, Z. Yong, M. Lei, L. Yong, Q. Qin, Erosion analysis of machine gun barrel and lifespan prediction under typical shooting conditions, *Wear*, 444-445, (2019) 203177.
- [59] A. Oudin, P. Lamesle, L. Penazzi, S. Le Roux, F. Rezai-Aria, Thermomechanical fatigue behavior and life assessment of hot work tool steels, *European structural integrity society*, 29 (2002) 195-201.
- [60] Astm STP590 Standard, A symposium sponsored by Committee E-24 on Fracture Testing of Metals, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS Brown University, Providence, R. I., 26-28 Aug, (1974).
- [61] W. Hesse, K. Brueninghaus, W. Dahl, Yielding- and fracture behavior of ferritic steels in the transition region of quasistatic to dynamic loading, *Nuclear Engineering and Design*, 96(2/3) (1986) 167-172.
- CMOD in CT specimens of TIG welded AA2219-T87, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(3) (2015) 935-944.
- [54] W. Asghar, M.A. Nasir, F. Qayyum, M. Shah, M. Azeem, S. Nauman, S. Khushnood, Investigation of fatigue crack growth rate in CARALL, ARALL and GLARE, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(7) (2017) 1086-1100.
- [55] M. Shah, C. Mabru, F. Rezai-Aria, Investigation of crack propagation in X38CrMoV5 (AISI H11) tool steel at elevated temperatures, *Procedia Engineering*, 2(1) (2010) 2045-2054.
- [56] J.H. Underwood, E. Troiano, Critical fracture processes in army cannons: a review, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 125(3) (2003) 287-292.
- [57] J.H. Underwood, M.D. Witherell, S. Sopok, J.C. McNeil, C.P. Mulligan, G.N. Vigilante, Thermomechanical modeling of transient thermal damage in cannon bore materials, *Wear*, 257(9-10)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Sayar, R. Molahamzadeh, M. H. Korani, M. Azadi, *Study of Autofrettage Process Effect in Thick-walled Cylinder with Metal Matrix Composite by the method of Finite Element Cyclic Stress Analysis*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(8) (2022) 1867-1894.

DOI: 10.22060/mej.2022.20983.7353



