



بررسی تجربی و عددی شکست اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار معمولی و ماسوره‌های آلومینیوم 6061-T6 با استفاده از روش مکانیک آسیب GTN

محمد مهدی انتظاریان^۱، داود افشاری^{۲*}، محمد کریمی ایوانکی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

* dafshari@znu.ac.ir، ۴۵۲۷۱۳۸۷۹۱ صندوق پستی زنجان

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۷ تیر ۱۴۰۱

پذیرش: ۲۳ مرداد ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

ابزار معمولی و ماسوره‌ای

مکانیک آسیب

گارسون- تورگارد- نیدلمن

هدف از این مطالعه، بررسی تجربی و عددی شکست اتصال جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 6061-T6 تحت آزمون کششی- برشی با استفاده از روش مکانیک آسیب می‌باشد. در گذشته به دلیل مشکل در ایجاد جوش‌های با استحکام بالا و مقاوم به خستگی و خوردگی در آلیاژهای آلومینیوم، استفاده از جوش کاری را در این صنایع محدود کرده بود، اما با ظهور فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، استفاده از آلیاژهای آلومینیوم مورد توجه قرار گرفته و جوش کاری آنها امکان پذیر شده است. استفاده از مواد سبک بویژه آلیاژهای آلومینیوم در صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی و هوافضا به سرعت در حال افزایش است و کارکرد این آلیاژها نیازمند توسعه‌ی روش‌های اتصال دهی و جوش کاری می‌باشد. لذا بررسی و تحلیل جوش اصطکاکی اغتشاشی دارای اهمیت بسیار بالایی می‌باشد. در این مطالعه جهت بررسی شکست اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی از روش مکانیک آسیب گارسون- تورگارد- نیدلمن استفاده شده است. شبیه‌سازی شکست اتصال جوش تحت بارگذاری کششی- برشی با بکارگیری روش المان محدود صورت گرفت و از روش مکانیک آسیب برای تحلیل شکست استفاده شده است. جهت صحت سنجی مدل، ۸ نمونه شامل ۴ نمونه جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار معمولی و ۴ نمونه جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار ماسوره‌ای، جوش کاری شده و استحکام شکست آنها تحت آزمون تجربی کششی- برشی اندازه‌گیری شده است. مقایسه میان نتایج مدل مکانیک آسیب و آزمون تجربی نشان می‌دهد مدل مکانیک آسیب گارسون دارای دقت نسبتاً مطلوبی در پیش‌بینی نیروی شکست می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که از مدل المان محدود ارائه شده می‌توان بجوی برای پیش‌بینی نقطه شروع و چگونگی شکست در اتصال جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده نمود.

Experimental and numerical study on failure of friction stir welded AA6061-T6 joint in conventional and bobbin tool under tensile-shear test using GTN model

Mohammad Mahdi Entezarian, Davood Afshari*, Mohammad Karimi Ivanaki

Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

* P.O.B. 4537138791 Zanjan, Iran, dafshari@znu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 7 May 2022

First Decision: 28 June 2022

Accepted: 14 August 2022

Keywords:

Friction stir welding

Damage Model

Gurson-Tvergaard-Needleman

AA6061-T6

Bobbin Tool

Abstract

The main purpose of this study is experimental and numerical investigation on failure of friction stir welded AA6061-T6 joint under tensile-shear test using damage model. In the past, due to the problem of development in high-strength welds, fatigue and corrosion resistance in aluminum, the use of welding in these industries was limited. However, with the advent of the friction stir welding process, aluminum alloys has been considered and their welding has become possible. The use of lightweight materials, especially aluminum alloys in the automotive, shipbuilding and aerospace industries is increasing rapidly and the operation of these alloys requires the development of joining and welding methods. Therefore, the study and analysis of friction stir welding is substantial. In this study Gurson-Tvergaard- Needleman (GTN) model is utilized to study the failure of welded joint. A finite element (FE) model is developed to simulate failure of the welded joint under tensile-shear test. To validate the model, 8 samples including 4 samples of friction stir welds with conventional tool and 4 samples with bobbin tool are welded with different welding parameters to obtain failure. The comparison between experimental and FE model results shows that the GTN model has a good reliability to predict the failure force. In addition, the results show that the FE model can predict truly the starting of failure in the welded joint.

Please cite this article using:

M. M. Entezarian, D. Afshari, M. Karimi Ivanaki, Experimental and numerical study on failure of friction stir welded AA6061-T6 joint in conventional and bobbin tool under tensile-shear test using GTN model, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 46- 55, 2022 (in Persian).
<https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.157669>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

مختلف با خواص ریزساختار و سختی متفاوت مشتمل بر منطقه اغتشاشی (SZ)، ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)، ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و فلز پایه (BM) می‌گردد. تفاوت موجود در جهت چرخش و جهت پیشروی ابزار منجر به ایجاد دو سمت پیشرو و پسرو با خواص جوش متفاوت به جهت تفاوت در نحوه انتقال حرارت و جریان مواد می‌گردد [۱].

شکل ۱ شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با هندسه ابزار ماسوره‌ای در اتصال لب‌به‌لب دو صفحه تخت را نشان می‌دهد. هندسه ابزار ماسوره‌ای منجر به جوش کاری هر دو سمت ناحیه اتصال می‌گردد که نواحی ذکر شده جوشکاری در سه قسمت سطح بالایی، سطح میانی و سطح پایینی جوش کاری ایجاد می‌شوند که با یکدیگر تفاوت‌هایی را به لحاظ خواص متالورژیکی دارند. اساس فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدین صورت است که ابزار در حال چرخش با سرعت چرخشی مورد نظر پس از تماس با قطعه کار و اندکی مکث جهت تولید اولیه حرارت، با سرعت پیشروی مناسب در امتداد درز دو ورق حرکت می‌کند. حرارت ایجاد شده در اثر اصطکاک سطح قطعه کار با شانه‌های بالایی و پایینی در ابزار ماسوره‌ای باعث نرم شدن قطعه جوش کاری شونده شده و با حرکت ابزار در راستای جوش کاری تغییر شکل پلاستیک شدید منجر به افزایش حرارت تولیدی متأثر از آن و ایجاد جریانی از فلز تغییر نرم و شکل یافته را باعث می‌شود. در نتیجه این فرایند اتصال مناسبی را بین دو ورق ایجاد می‌کند.

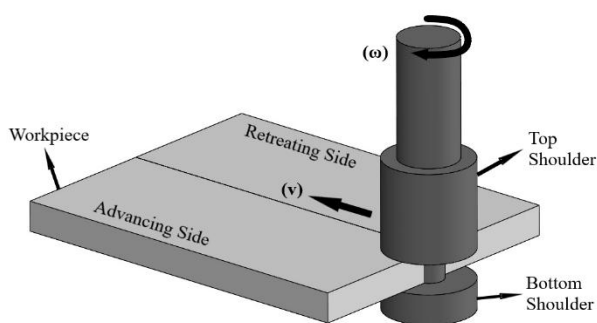


Fig. 1 Schematic of the Bobbin Friction Stir Welding process
شکل ۱ شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با هندسه ابزار ماسوره‌ای

یکی از روش‌های اطمینان از کیفیت و استحکام مناسب اتصال جوش کاری شده، پیش‌بینی شکست اتصال می‌باشد. امروزه مکانیک آسیب به عنوان عضو مهمی از خانواده تئوری مکانیک شکست یکی از روش‌های مناسب جهت بررسی شکست در سازه‌ها می‌باشد. مکانیک آسیب حوزه‌ای از مکانیک است که

استفاده از مواد سبک وزن با نسبت استحکام به وزن بالا در ساخت سازه‌ها تأثیر بسزایی در کاهش هزینه ناشی از مصرف سوخت، تعمیر و نگهداری مکرر دارد. آلیاژهای آلومینیوم دارای خواص مطلوب مختلفی از جمله مقاومت در برابر خوردگی خوب، نسبت استحکام به وزن بالا و استحکام خستگی مطلوب است که آنها را قادر می‌سازد تا در قطعات مختلف سازه‌ای و سایر اجزاء برای صنایع هوایی، دریایی، کشتی سازی و حمل و نقل ریلی مورد استفاده قرار گیرند. در گذشته به دلیل مشکل در ایجاد جوش‌های با استحکام بالا مقاوم به خستگی و خوردگی در آلیاژهای آلومینیوم (سری‌های ۲۰۰۰ و ۶۰۰۰) مورد استفاده در صنعت هوافضا و دریایی، استفاده از جوش کاری را در این صنایع محدود کرده بود. این دسته از آلیاژهای آلومینیوم به طور کلی به عنوان آلیاژهای غیرقابل جوشکاری دسته‌بندی شده بودند که به دلیل ساختار متخلخل و همچنین از دست رفتن خواص مکانیکی در منطقه‌ی ذوب، کیفیت جوش در مقایسه با فلز پایه بسیار ضعیف بوده است. این عوامل باعث شده است که اتصال این آلیاژها توسط فرایندهای جوش کاری معمولی با کیفیت مطلوب نباشد. بعضی آلیاژهای آلومینیومی را می‌توان با جوش کاری مقاومتی به هم متصل کرد، ولی آماده کردن سطح آن‌ها برای این جوش کاری به لحاظ اقتصادی و زمان به صرفه نمی‌باشد؛ زیرا اکسید شدن سطح در حین فرایند یک محدودیت بزرگ است، اما با ظهور فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، این سری از آلیاژهای آلومینیوم مورد توجه قرار گرفته و جوشکاری آنها امکان‌پذیر شده است.

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، فرایند جوش کاری حالت جامد نسبتاً جدیدی است که از این روش برای اتصال آلیاژهای همجنس همانند آلومینیوم، منیزیم، مس و حتی غیرهمجنس که اساساً قابلیت جوش‌پذیری پایینی دارند، استفاده می‌شود. در این فرایند تولید حرارت و جریان مواد توسط هندسه ابزار و پارامترهای جوش کاری صورت می‌گیرد که مهم‌ترین عوامل ایجاد یک اتصال مناسب می‌باشند. مکانیزم فرایند جوش کاری در این روش بر اساس یک عملیات ترمومکانیکی که ترکیبی از حرارت ناشی از اصطکاک و عمل اغتشاش مواد است می‌باشد نرم شدن و مخلوط شدن فصل مشترک بین دو ورق و قطعه کار توسط یک ابزار غیر مصرفی انجام می‌گیرد.

اگرچه حرارت جوش کاری در این فرایند کمتر از روش‌های ذوبی است ولی تغییرات سختی و ریزساختاری نواحی جوشکاری؛ بویژه تبلور مجدد دینامیکی که باعث ایجاد مناطق

فراهم شده است. سپس مدل گارسون برای نمونه‌ی کششی به روش اجزای محدود در نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی و ضرایب مدل آسیب گارسون بر اساس فرآیند کالیبراسیون اجزای محدود استخراج می‌گردد. در ادامه مدل گارسون حاصل، جهت پیش‌بینی شکست در نمونه استاندارد کشش به کار گرفته شده است.

سان و همکارانش [۷] برای بررسی استحکام اتصال جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی از مدل GTN استفاده کرده‌اند. آنها پارامترهای مدل GTN را در هر یک از نواحی جوش اصطکاکی اغتشاشی شناسایی نموده‌اند. ژیانگ و همکارش [۸] با استفاده از یک مدل المان محدود و روش مکانیک آسیب GTN شکست در اتصالات لوله‌ای فولادی جوشکاری شده را شبیه سازی نموده‌اند. رمل و همکارانش [۹] نیز از مدل GTN جهت پیش‌بینی رشد ترک در لوله های جوش کاری شده از جنس سوپر آلیاژ اینکونل استفاده کرده‌اند. وو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۱۰] نیز رشد ترک و شکست در اتصال لوله‌ای جوش- کاری شده فولادی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها نتایج بدست آمده از روش کرنش سنج تصویری را با نتایج مدل گارسون مقایسه کردند و همخوانی دقیقی را مشاهده کردند. بیلدیز و ییلماز [۱۱] نیز به صورت تجربی پارامترهای مدل GTN را برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ استخراج نموده‌اند. آنها با استفاده از آزمون کشش، تصاویر میکروسکپ نوری و روبشی و نیز آزمون پرش اشعه ایکس پارامترهای مورد نیاز مدل GTN را برای این آلیاژ بدست آورده‌اند.

مطالعه پژوهش‌های پیشین نشان می دهد که استفاده از روش مکانیک آسیب در بررسی اتصال جوش نقطه‌ای و جوش اصطکاکی اغتشاشی متمرکز بر فولادها بوده است و بررسی آلیاژهای آلومینیومی به ندرت انجام شده است. با توجه به استفاده روزافزون از آلیاژهای آلومینیومی در صنایع هوایی، دریایی، کشتی‌سازی و همچنین صنایع خودروسازی، بررسی نحوه شکست جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیومی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. لذا هدف از این مطالعه استفاده از روش مکانیک آسیب جهت بررسی شکست در اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 می‌باشد. بدین منظور از روش گارسون-تورگارد-نیدلمن بعنوان یک روش مکانیک آسیب استفاده شده است. در این مطالعه ابتدا یک مدل المان محدود جهت شبیه‌سازی شکست اتصال جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی در آزمون کششی- برشی و استخراج پارامترهای مدل مکانیک آسیب ایجاد شده است.

یکی از واقعیت‌های موجود در ماده را که همانا ترک‌های ریز، ریزحفره‌ها و سایر عیوب هستند، با ظرافت مدل‌سازی کرده و با استفاده از تکنیک‌های خاص قابلیت پیاده‌سازی تعداد آنها را فراهم می‌سازد. روش‌های ریزمکانیکی آسیب، تقریباً مناسب‌ترین روش برای بررسی شکست در مواد نرم به حساب می‌آیند. شبیه- سازی فرایند فیزیکی جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها در مدل‌های آسیب، بر مبنای اصول مکانیک محیط‌های پیوسته استوار است. یکی از پرکاربردترین روش های توصیف اثرات ریزمکانیکی آسیب در فلزات شکل‌پذیر، روش گارسون-تورگارد- نیدلمن (GTN) می‌باشد.

استفاده از روش گارسون جهت بررسی شکست در اتصال جوش نقطه ای برای اولین بار توسط اسپیرنگمن و کونا [۲] انجام شده است. پژوهشگران این مقاله از مدل گارسون برای توصیف تغییر شکل پلاستیک و همچنین رفتار شکست اتصال جوش نقطه‌ای فولاد Ste690 استفاده کردند. آنها برای حل شرایط مرزی غیرخطی از کد نویسی المان محدود استفاده کرده و با نتایج تجربی آزمون کشش برای نمونه های ناچ‌دار مقایسه نموده‌اند. نیلسن در سال ۲۰۱۰ [۳] از جدیدترین روش‌های توسعه یافته مدل گارسون برای توصیف و بررسی شکست در حالت‌های مختلف اتصال برای فولاد DP600 استفاده کرده و نتایج را با نتایج تجربی مقایسه نموده است. نیلسن لازمه یک مدل گارسون کامل برای مواد را پیش‌بینی دقیق کسر حجمی حفرات، هندسه حفرات، فاصله نسبی حفرات از یکدیگر و دانش دقیق در رابطه با ریزساختار ماده بیان کرد. سامر در سال ۲۰۱۰ [۴] تغییر شکل و رفتار شکست را در جوش نقطه‌ای فولاد DP600 مدل‌سازی کرده است. سامر به منظور یافتن ضخامت قطعه، ظرفیت تحمل بارگذاری و مود شکست در اتصال جوش نقطه‌ای از یک مدل دقیق المان محمود شامل فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش در شرایط بار گذاری کششی- برشی استفاده کرده است.

نیلسن و تورگارد در سال ۲۰۱۰ [۵] با استفاده از روش اصلاح شده برشی گارسون به صورت عددی شکست را در جوش نقطه‌ای فولاد DP600 آنالیز کردند. آنها پیش‌بینی شکست را با استفاده از مدل گارسون و مدل تغییر شکل برشی اصلاح شده مقایسه کردند و محمد مشایخی و اسماعیل شریفی در سال ۲۰۱۰ [۶] در مطالعه‌ای اعتبار مدل آسیب گارسون به صورت تجربی و عددی را برای فولاد A533B مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ابتدا با انجام یک آزمون کشش تحت شرایط تنش سه‌بعدی شرایط لازم جهت استخراج پارامترهای مدل گارسون

کردن جهت دستیابی به خواص مورد نظر می‌باشد. پس از انجام این عملیات سختی ابزارهای ساخته شده از HRC ۱۵/۲ به HRC ۵۳-۵۶ افزایش یافت. شکل هندسی ابزارهای ساخته شده در شکل ۲ ارائه شده است.

در این مطالعه، نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM-E8 [۱۲] تحت عملیات برش وایرکات عمود بر خط اتصال و به جهت اطمینان از کیفیت نمونه کشش از مرکز ورق جوش کاری شده بریده شدند، و با اعمال نیروی محوری از طریق سیستم هیدرولیک دستگاه کشش، نمونه‌ها ابتدا گلوبی و سپس دچار شکست شدند. همچنین جهت آزمون کششی- برشی نمونه‌های جوش کاری شده از دستگاه تست کشش مدل STM-50 ساخت شرکت سنتام با نرخ کرنش ۲ میلی‌متر بر دقیقه در دمای اتاق انجام شد. شکل ۳ تصویر نمونه تحت آزمون کششی- برشی را نمایش می‌دهد.

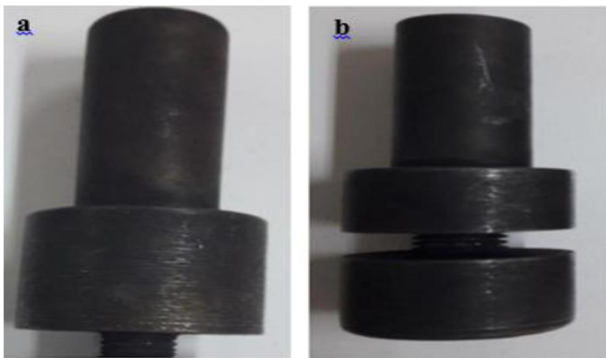


Fig. 2 FSW tools used in this work: (a) Conventional tool and (b) Bobbin tool

شکل ۲ ابزارهای ساخته شده. (a) معمولی و (b) ماسوره‌ای

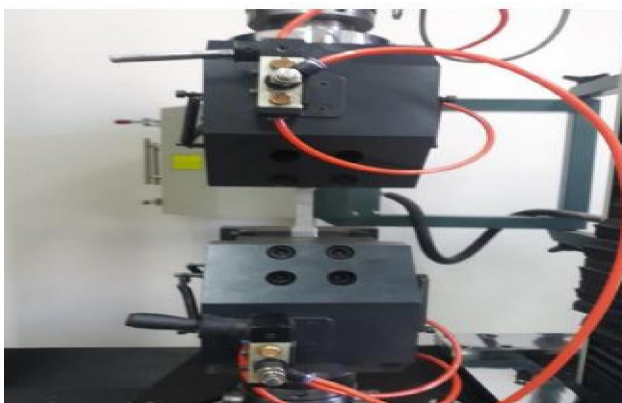


Fig. 3 The tensile- shear test of friction stir welded joint

شکل ۳ آزمون کششی- برشی اتصال جوش کاری شده

۲-۲- مدل مکانیک آسیب گارسون- تورگارد- نیدلمن (GTN) گارسون در سال ۱۹۷۷ یک جریان پتانسیل برای رشد حفره در یک فلز ایده‌آل پلاستیک ارائه کرد که بعداً توسط تورگارد و

همچنین برای ارزیابی مدل المان محدود نتایج بدست آمده از مدل با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی مقایسه شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- روش‌های تجربی

در این پژوهش از هر دو ابزار معمولی و ماسوره‌ای جهت جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 استفاده شده است.

در این مطالعه از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 به ضخامت ۶ میلی‌متر به عنوان فلز پایه جوشکاری استفاده شده است. قطعات مورد نظر با استفاده از وایرکات در ابعاد 250×100 میلی‌متر بریده و لبه‌ها با عملیات فرزکاری گونیا و پرداخت شدند و به منظور حذف آلودگی‌ها و چربی، سطح قطعات سنباده‌زنی شده و در محلول استن و الکل قرار داده شدند.

برای انتخاب پارامترهای مناسب جوش کاری، محدوده نسبتاً گسترده‌ای از سرعت چرخشی و پیشروی ابزار در هر دو ابزار معمولی و ماسوره‌ای و همچنین عمق نفوذ و زاویه ابزار در ابزار معمولی انتخاب شدند که ترکیب تصادفی این پارامترها به عنوان پارامترهای جوشکاری مطابق جدول ۱ انتخاب شده، و در انجام فرایند جوش کاری اعمال شدند.

جدول ۱ پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

Table 1 The friction stir welding parameters

نوع ابزار	سرعت دورانی (RPM)	سرعت پیشروی (mm/min)	زاویه ابزار	شماره آزمایش (نمونه)
ماسوره‌ای	۹۰۰	۲۵	۰	۱
ماسوره‌ای	۹۰۰	۳۲	۰	۲
ماسوره‌ای	۱۱۰۰	۲۵	۰	۳
ماسوره‌ای	۱۱۰۰	۳۲	۰	۴
معمولی	۹۰۰	۲۵	۲	۵
معمولی	۹۰۰	۳۲	۲	۶
معمولی	۱۱۰۰	۲۵	۲	۷
معمولی	۱۱۰۰	۳۲	۲	۸

ابزار مورد استفاده برای انجام فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی از جنس فولاد ابزار گرمکار H13 ساخته شد که پرمصرف‌ترین فولاد در جهت ساخت ابزار این جوش کاری می‌باشد. پس از اتمام ماشین‌کاری و ساخت ابزارهای معمولی و ماسوره‌ای به جهت رسیدن به خواصی مانند سختی بالا و مقاومت به سایش مناسب، ابزارها تحت عملیات سخت کاری قرار گرفتند که این عملیات شامل آستنیت‌زدن و سپس سرد

$$\dot{f}_v = \left[\frac{3}{2} q_1 q_2 f_v \sinh \left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_H}{\sigma_y} \right) + A_n(p) \right] \dot{p} \quad (4)$$

و $A_n(p)$ برابر است با:

$$A_n(p) = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sinh \left(\frac{p - \varepsilon_n}{S_N} \right) \right] \quad (5)$$

در این رابطه S_N و ε_n به ترتیب انحراف استاندارد و مقدار میانگین کرنش پلاستیک هستند که می‌توان به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ در نظر گرفت [۵]. همچنین f_N کسر حجمی جوانه‌زنی حفره‌ها و ε برابر با کرنش پلاستیک است.

۲-۳- مدل المان محدود

در این مطالعه از نرم افزار تجاری آباکوس جهت شبیه‌سازی شکست اتصال جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی تحت آزمون کششی برشی استفاده شده است. هندسه اتصال مطابق با نمونه‌های جوش کاری شده بوده و نوع جوش کاری به صورت جوش لب‌به‌لب است. همچنین برای پیاده‌سازی مدل مکانیک آسیب گارسون - تورگارد- نیدلمن از سابروتین نویسی یومت استفاده شده است. برای ایجاد مدل هندسی در شبیه‌سازی اجزای محدود همواره سعی بر آن است که قطعات در ساده‌ترین هندسه ممکن ترسیم شوند تا زمان لازم برای تحلیل توسط رایانه کاهش یابد.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در این پژوهش نیز برای ساده سازی شبیه‌سازی مدل کشش تک محوره از مدل یک چهارم طول سنجه استفاده شده است. در این مطالعه، از یک مدل جامد ۳ بعدی تغییر شکل‌پذیر کمک گرفته شده است. به طوری که ابعاد و هندسه قطعه کار با طول سنجه ۲۷/۵ میلی‌متر و عرض ۶/۲۵ میلی‌متر و همچنین ضخامت ۶ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۵ نمونه مدل‌سازی و مش‌بندی مدل المان محدود ارائه شده است.



Fig. 4 Schematic of the Bobbin Friction Stir Welding process

شکل ۴ شماتیکی از ناحیه ۱/۴ مورد استفاده در شبیه‌سازی آزمون کششی-برشی

با در نظر گرفتن معادلات ساختاری که در بخش پیشین به آن اشاره شد، مدل GTN داری ۹ پارامتر اصلی است و نیاز است ۹ پارامتر تعریف شوند.

نیدلمن توسعه داده شد. آنالیز جریان پلاستیک در مدل گارسون در یک محیط متخلخل و با فرض رفتار پیوسته ماده صورت می‌پذیرد. حفره‌ها در این مدل به طور غیر مستقیم حضور داشته و تنها بر رفتار کلی ماده تأثیر می‌گذارند. این تأثیر در سراسر ماده میانگین‌گیری شده و اثر آن بر شرایط تسلیم ماده لحاظ می‌گردد [۱۳]. استحکام تسلیم در مدل گارسون به مقدار اندکی به تنش هیدرواستاتیک وابسته است، در حالی که استحکام تسلیم در پلاستیسیته کلاسیک مستقل از تنش هیدرواستاتیک در نظر گرفته می‌شود. همچنین برخلاف برخی مدل‌های مشابه، امکان پیش‌بینی شکست بر اساس یک معیار گسیختگی در این مدل مکانیک آسیب وجود دارد. اساس مدل گارسون بر استفاده از کسر حجمی حفره در تابع تسلیم برای یک ماده پلاستیک متخلخل استوار است [۵]. بعدها تورگارد و نیدلمن پارامترهای دیگری از ماده را به این مدل اضافه کردند تا مدل GTN به صورت رابطه (۱) ارائه گردد [۱۴]:

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_y^2} + 2q_1 f_v^* \cosh \left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_H}{\sigma_y^2} \right) - (1 + q_1 f_v^{*2}) \quad (1)$$

که در این رابطه σ_{eq} تنش موثر وون مایرز، و σ_y تنش تسلیم برای ماده آسیب ندیده، σ_H تنش هیدرواستاتیک، q_1 و q_2 نیز متغیرهای آسیب ماده هستند که توسط تورگارد و نیدلمن معرفی شدند. در واقع معرفی این دو ضریب به منظور توجیه آثار متقابل حفره‌ها در آرایش چند حفره‌ای و نیز تطبیق با داده‌های تجربی صورت گرفته است. f_v^* نیز یک تابع برای ضریب تخلخل ماده f است که برای تعیین اثر به هم پیوستن ریزحفره‌ها از رابطه (۲) بدست می‌آید [۵]:

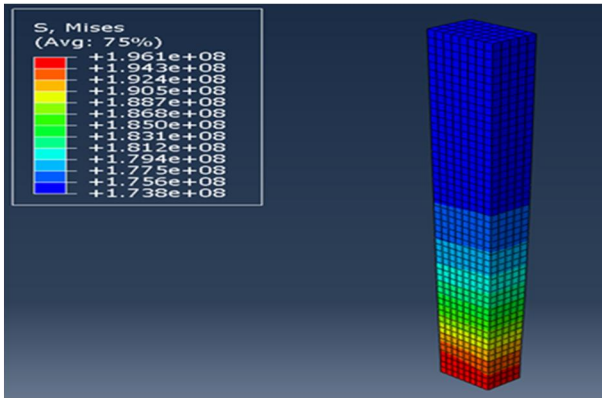
$$f_v^* = \begin{cases} f_v & \text{if } f_v < f_c \\ f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} (f_v - f_c) & \text{if } f_v > f_c \end{cases} \quad (2)$$

f_c و f_F به ترتیب معرف کسر حجمی حفره بحرانی (جایی که حفره‌ها به یکدیگر می‌پیوندند) و کسر حجمی حفره در هنگام شکست نهایی ماده هستند. f_u^* نیز مقدار نهایی پارامتر آسیب است که از رابطه (۳) بدست می‌آید [۵]:

$$f_u^* = \frac{1}{q_1} \quad (3)$$

$f_v^* = 0$ معرف ماده کاملاً متراکم بوده و در این حالت سطح تسلیم گارسون به سطح تسلیم وون‌مایرز کلاسیک تقلیل می‌یابد. هم‌چنین $f_v^* = 1$ بر ماده کاملاً متخلخل (حفره‌دار)، که فاقد ظرفیت تحمل تنش است، دلالت دارد.

نرخ رشد کسر حجمی حفره، \dot{f}_v ، بر حسب نرخ کرنش پلاستیک، \dot{p} برابر است با:



(a)

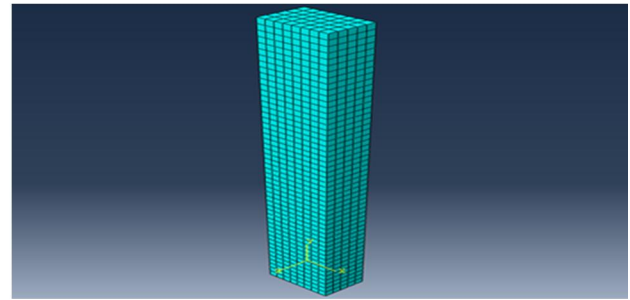
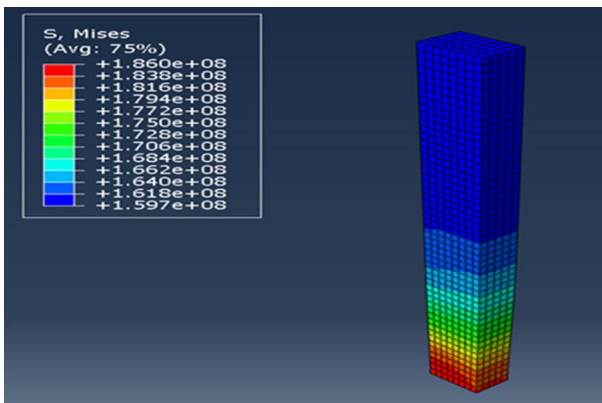


Fig. 5 The finite element model of friction stir welded joint

شکل ۵ مدل المان محدود از ناحیه ۱/۴ مورد استفاده

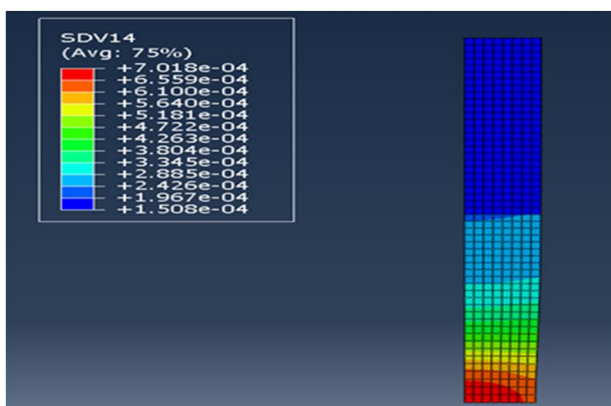


(b)

Fig. 6 The distribution of von-Mises equivalent stress in friction stir welded joint sample (a No.4 and b) No.8

شکل ۶ توزیع تنش‌های وون مایزر در نمونه شماره ۴ (a) و ۸ (b)

در شکل ۷، کانتور SDV۱۴ که بیانگر کسر حجمی حفرات است، برای نمونه شماره ۴ و ۸ را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود در المان‌هایی که در اطراف ناحیه اتصال جوش وجود دارند و بیشترین تنش نیز وجود دارد میزان کسر حجمی حفرات بیشتر از المان‌های دیگر است. در ادامه به بررسی نمودار تغییرات کسر حجمی حفرات با افزایش نیرو (نموی بارگذاری در حل ضمنی) پرداخته می‌شود.



(a)

۳- نتایج و بحث

در شکل ۶ توزیع تنش‌های وون مایزر در نمونه‌های شماره ۴ و ۸ نشان داده شده است. در نمونه‌ها همان‌طور که مشخص است تمرکز تنش در ناحیه اتصال وجود دارد و در این بین اطراف منطقه SZ و TMAZ در اتصال بیشترین مقدار تنش را دارد و از این رو انتظار می‌رود بیشترین میزان کسر حجمی حفرات در این ناحیه باشد و شکست از این ناحیه رخ دهد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در لبه‌ی انتهایی قطعه اتصال کمترین تنش وجود دارد و رنگ کانتور تنش در این ناحیه‌ها به رنگ آبی درآمده است. دلیل این امر آزادی حرکت این ناحیه‌ها و مقید نبود آن‌هاست این امر باعث می‌شود تا تحت کرنش قرار نگیرند تا کمترین تنش را داشته باشند.

جدول ۲ پارامترهای مدل GTN برای آلیاژ آلومینیوم AA606-T6

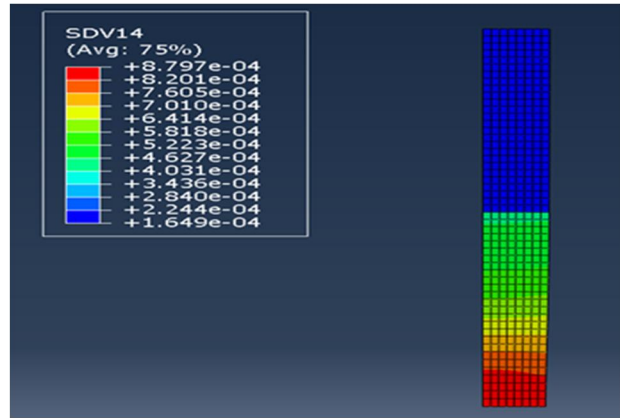
Table 2 GTN model parameters for AA6061-T6

مقدار ثابت	ضرایب ثابت مدل GTN	مقدار ثابت	ضرایب ثابت مدل GTN
۰/۱	S_N	۰/۰۰۰۱۲۵	f_0
۱/۵	q_1	۰/۰۱۳	f_c
۱	q_2	۰/۰۴	f_F
۲/۲۵	q_3	۰/۰۰۸	f_N
		۰/۳	ϵ_n

سپس با وارد شدن به ناحیه پلاستیک تا شکست نهایی به صورت تصاعدی کسر حجمی افزایش می‌یابد.

نمودار تغییرات جوانه زنی حفرات با افزایش نیرو در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. نمودار نرخ جوانه‌زنی حفرات تقریباً مشابه نمودار نرخ رشد حفرات است به این ترتیب که در ابتدای حل با ثابت بودن کسر حجمی حفرات نرخ جوانه‌زنی حفرات صفر است و سپس به صورت تصاعدی تا رسیدن به شکست نهایی افزایش می‌یابد.

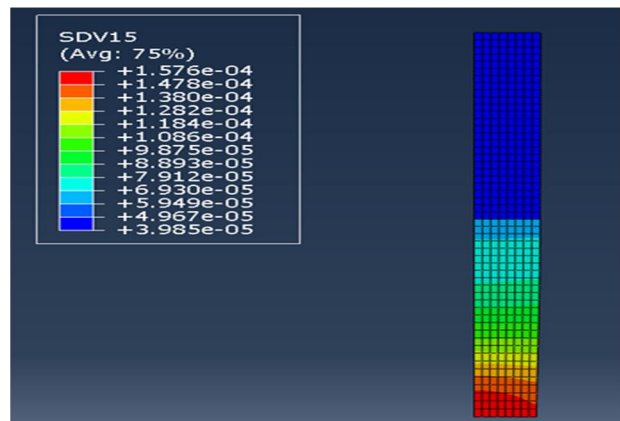
نمودار تغییرات نرخ رشد حفرات با افزایش نیرو برای نمونه‌های شماره ۴ و ۸ در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. با در نظر داشتن نمودار کسر حجمی حفرات نمودار نرخ رشد حفرات قابل پیش‌بینی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدای حل که کسر حجمی حفرات ثابت بود نرخ رشد حفرات صفر است سپس به یکباره تا رسیدن به کسر حجمی نهایی افزایش می‌یابد.



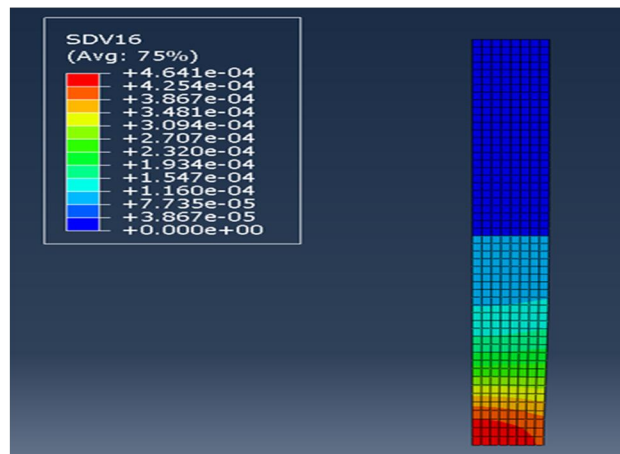
(b)

Fig. 7 The void volume fraction in friction stir welded joint sample a) No.4 and b) No.8

شکل ۷ کسر حجمی حفرات نمونه شماره (a) ۴ و (b) ۸



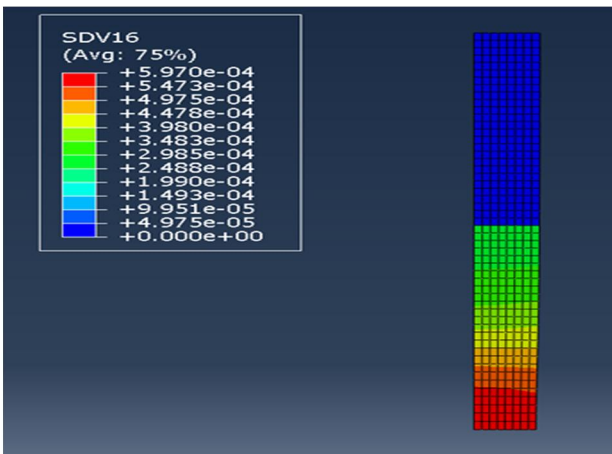
(a)



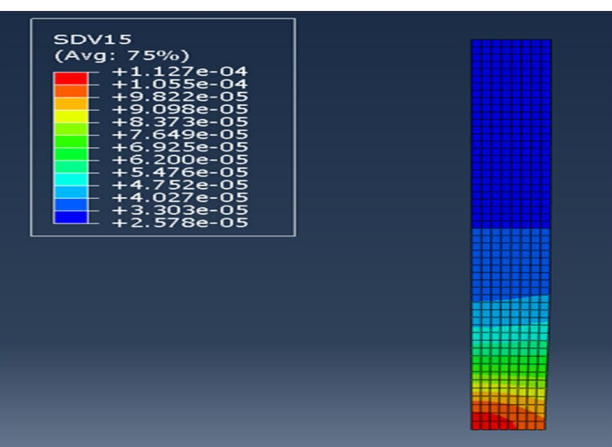
(b)

Fig. 8 The growth of exiting voids in friction stir welded joint sample a) No.4 and b) No.8

شکل ۸ کانتور نرخ رشد حفرات نمونه شماره (a) ۴ و (b) ۸



(a)



(b)

Fig. 9 The nucleation rate of new voids in friction stir welded joint sample a) No.4 and b) No.8

شکل ۹ کانتور نرخ جوانه‌زنی حفرات نمونه شماره (a) ۴ و (b) ۸

نمودار تغییرات کسر حجمی حفرات با افزایش نیرو برای نمونه‌های شماره ۴ و ۸ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدای حل، کسر حجمی مقدار تقریباً ثابتی است که این همان ناحیه الاستیک فلز است

طریق زیرروال یومت نوشته شده با نتایج تست کشش در دو نمونه مقایسه شده است.

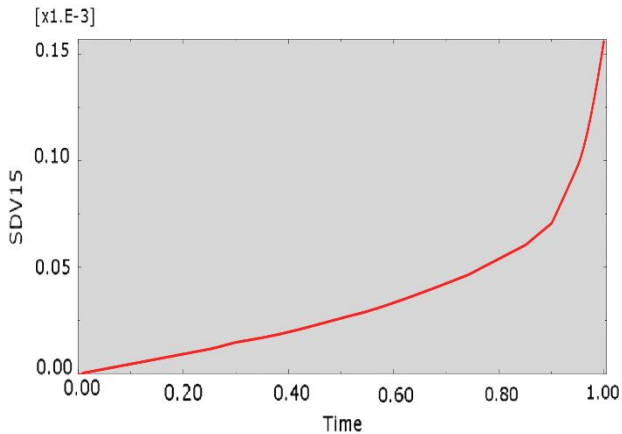


Fig. 13 The diagram of growth of exiting voids-force in tensile-shear test (sample No.8)

شکل ۱۳ نمودار نرخ رشد حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون کششی-برشی (نمونه شماره ۸)

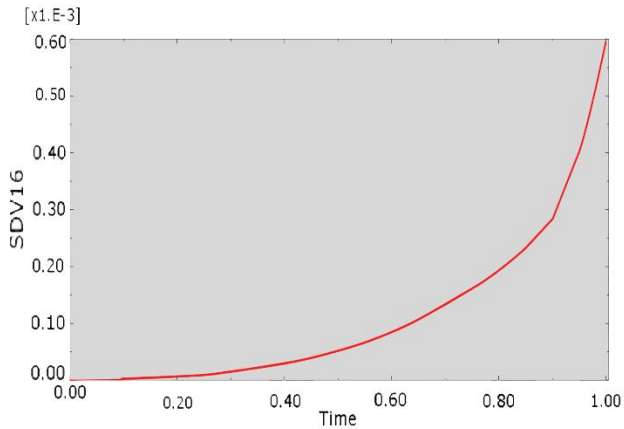


Fig. 14 The diagram of nucleation of new voids-force in tensile-shear test (sample No.4)

شکل ۱۴ نمودار نرخ جوانه‌زنی حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون کششی-برشی (نمونه شماره ۴)

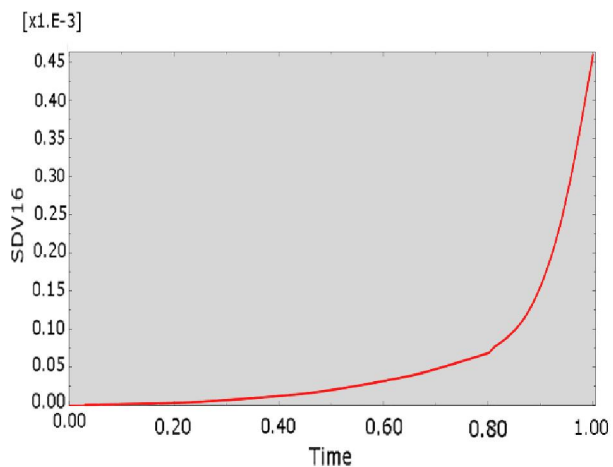


Fig. 15 The diagram of nucleation of new voids-force in tensile-shear test (sample No.8)

شکل ۱۵ نمودار نرخ جوانه‌زنی حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون کششی-برشی (نمونه شماره ۸)

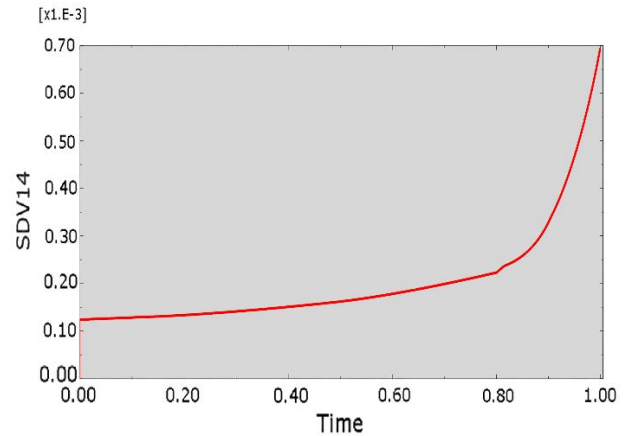


Fig. 10 The diagram of void volume fraction-force in tensile-shear test (sample No.4)

شکل ۱۰ نمودار تغییرات کسر حجمی حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون

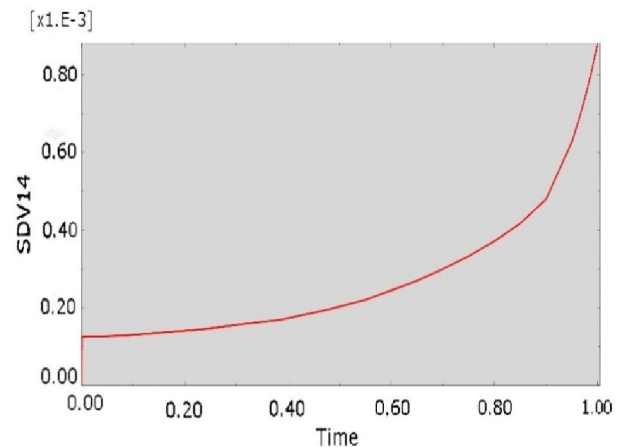


Fig. 11 The diagram of void volume fraction-force in tensile-shear test (sample No.8)

شکل ۱۱ نمودار تغییرات کسر حجمی حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون کششی-برشی (نمونه شماره ۸)

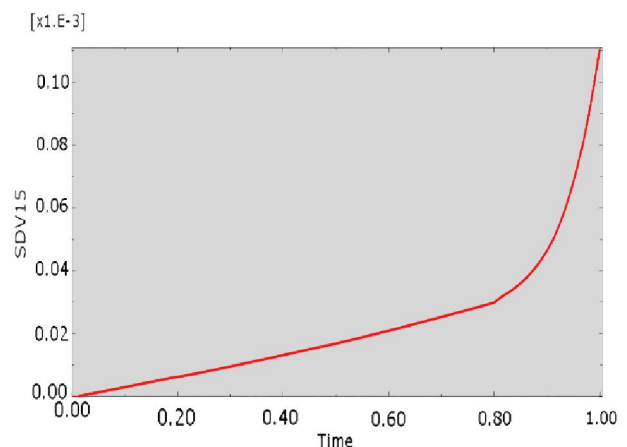


Fig. 12 The diagram of growth of exiting voids-force in tensile-shear test (sample No.4)

شکل ۱۲ نمودار نرخ رشد حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون کششی-برشی (نمونه شماره ۴)

در پایان برای صحت‌سنجی نمودار تنش-کرنش به دست آمده از

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مطالعه شکست اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 تحت آزمون کششی-برشی با استفاده از مدل مکانیک آسیب گارسون-تورگارد-نیدلمن (GTN) شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی شکست اتصال از یک مدل المان محدود استفاده شده و مدل مکانیک آسیب از طریق زیرروال یومت در این مدل اعمال گردید. همچنین ۸ سری نمونه شامل ۴ نمونه‌ی جوش اصطکاکی اغتشاشی با ابزار معمولی و ۴ نمونه‌ی جوش اصطکاکی اغتشاشی با ابزار ماسوره‌ای آماده شده و نیروی شکست اتصال در آزمون کششی-برشی جهت صحت‌سنجی مدل المان محدود اندازه‌گیری شد. با استفاده از مدل المان محدود کسر حجمی حفره‌ها، نرخ رشد و نرخ جوانه‌زنی حفره‌ها در اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی استخراج گردید. نتایج نشان داد که در ابتدای شبیه‌سازی که مقدار نیرو کم می‌باشد، مقدار کسر حجمی حفره‌ها ثابت و نرخ رشد و جوانه‌زنی حفره‌ها، صفر می‌باشند. به تدریج با افزایش نیرو، نرخ رشد و نرخ جوانه‌زنی حفره‌ها افزایش پیدا کرده و متناسب با آن کسر حجمی حفرات نیز افزایش می‌یابد. این روند افزایش تا نقطه شکست ادامه پیدا می‌کند و نیروی شکست اتصال پیش‌بینی شده است. کسر حجمی حفرات، نرخ رشد حفرات در لحظه شکست و نرخ جوانه‌زنی حفرات در ناحیه جوش که تمرکز تنش بیش‌تر است رخ می‌دهد و شکست نیز در نواحی بین SZ و TMAZ در جوش اصطکاکی اغتشاشی ممکن است رخ دهد. لذا این مدل می‌تواند به خوبی محل ایجاد شکست را نیز پیش‌بینی کند. همچنین در انتها نیز مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و مدل المان محدود انجام پذیرفت که مدل GTN استفاده شده دارای دقت نسبتاً مطلوبی در پیش‌بینی نیروی شکست اتصال می‌باشد. نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی نشان دهنده نتایج مطلوب‌تر ابزار ماسوره‌ای در مقایسه با ابزار معمولی بوده است. در واقع استفاده از ابزار ماسوره‌ای منجر به افزایش استحکام کششی در نمونه‌های جوشی شده است.

۵- مراجع

- [1] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, *Friction Stir Welding and Processing*, Center for Friction Stir Processing, Department of Materials Science and Engineering, University of Missouri, Rolla, Mo 65409, USA, 2005.
- [2] M. Springmann, M. Kuna, Identification of material parameters of the Gurson-Tvergaard-Needleman model by combined experimental and numerical

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب منحنی‌های تنش در مقابل کرنش نمونه شماره ۴ و نمونه شماره ۸ در دو حالت منحنی تجربی و همچنین منحنی بدست آمده از طریق زیرروال یومت نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود منحنی بدست آمده از طریق زیرروال یومت که با استفاده از پارامترهای جدول ۲ می‌باشد. مقدار استحکام نهایی در نمونه معمولی برابر با ۱۸۶ مگاپاسکال و در نمونه ماسوره‌ای برابر با ۱۹۶ مگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با نتایج تست کشش، استحکام نهایی در نمونه معمولی برابر با ۱۵۶ مگاپاسکال و در نمونه ماسوره‌ای ۱۷۷ مگاپاسکال به دست آمد. دلیل این تفاوت و بیشتر بودن استحکام نهایی در شبیه‌سازی از طریق زیرروال یومت را می‌توان در نظر نگرفتن عیوب ایجاد شده و ناخالصی‌ها در این زیرروال در نمونه جوشی دانست.

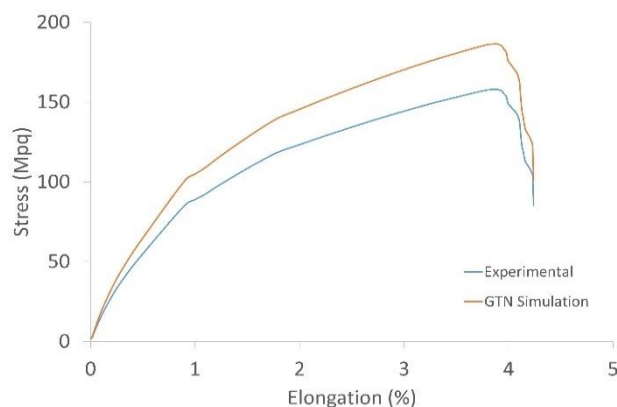


Fig. 16 The comparison between failure loads in tensile-shear test obtained from experimental test and FEM (sample No.4)

شکل ۱۶ مقایسه نتایج نیروهای شکست اتصال در آزمون کششی-برشی حاصل از آزمون تجربی و مدل المان محدود (نمونه شماره ۴)

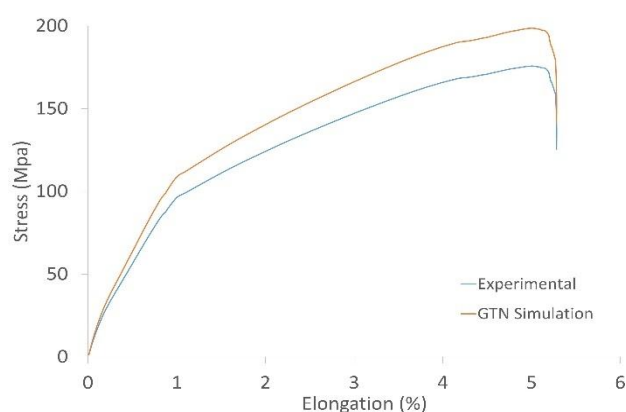


Fig. 17 The comparison between failure loads in tensile-shear test obtained from experimental test and FEM (sample No.8)

شکل ۱۷ مقایسه نتایج نیروهای شکست اتصال در آزمون کششی-برشی حاصل از آزمون تجربی و مدل المان محدود (نمونه شماره ۸)

- growth in a narrow gap Inconel dissimilar weld, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 173, pp. 94-100, 2019.
- [10] X. Wu, J. Shuai, K. Xu, Z. Lv, K. Shan, Determination of local true stress-strain response of X80 and Q235 girth-welded joints based on digital image correlation and numerical simulation, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 188, 2020.
- [11] R. A. Yildiz, S. Yilmaz, Experimental investigation of GTN model parameters of 6061 Al alloy, *European Journal of mechanics*, Vol. 83, pp. 1-10, 2020.
- [12] AWS/SAE D8.9M:2012, *Recommended practice for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials*, An American National Standard, 2012.
- [13] A. L. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I—yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, No.1, pp. 2-19, 1977.
- [14] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metallurgica*, Vol. 32, pp. 157-169, 1984.
- [15] H. Yu, K. Tieu, C. Lu, Y. Lou, X. Liu, A. Godbole, C. Kong, Tensile fracture of ultrafine grained aluminum 6061 sheets by asymmetric cryorolling for microforming. *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 23, pp. 1077-1095, 2014.
- techniques, *Computational Materials Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 544-552, 2005.
- [3] K. L. Nielsen, Predicting failure response of spot welded joints using recent extensions to the Gurson model, *Computational Materials Science*, Vol. 48, No. 1, pp. 71-82, 2010.
- [4] S. Sommer, Modeling of the fracture behavior of spot welds using advanced micro-mechanical damage models, *Materials Science Engineering*, Vol. 10, 2010.
- [5] K. L. Nielsen, V. Tvergaard, Ductile shear failure or plug failure of spot welds modelled by modified Gurson model, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 7, pp. 1031-1047, 2010.
- [6] M. Mashaieki, E. Sharifi, Damage models and steel parameters' investigation, *Scientific Journal of aerospace Mechanics*, Vol. 5, pp. 65-75, 2009. (in Persian فارسی)
- [7] G. Q. Sun, F. Y. Sun, F. L. Cao, S. J. Chen, M. E. Barkey, Numerical simulation of tension properties for Al-Cu alloy friction stir -welded joints with GTN Damage model, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 24, pp. 4358-4363, 2015.
- [8] B. Qiang, X. Wang, Ductile crack growth behaviors at different locations of a weld joint for an X80 pipeline steel: A numerical investigation using GTN models, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 213, pp. 264-279, 2019.
- [9] A. M. Remmal, V. VassiliParaskevaidis, S. Marie, A. Blouin, S. Chapuliot, Prediction of ductile crack