مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 391-399

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی و عددی شکست آلیاژ آلومینیوم 5083 به‌وسیلهٔ نمونهٔ صلیبی تحت بارگذاری دومحوره

فرهاد فرهادزاده[1]، مهدی سلمانی تهرانی[2*]، مهدی تاجداری[3]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد اراک، اراک
* اصفهان، صندوق‌پستی 8415683111، tehrani@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 29 شهریور 1396
پذیرش: 01 آذر 1396
ارائه در سایت: 24 آذر 1396

کلید واژگان:
شکست
آلیاژ آلومینیوم 321 اچ-5083
آزمون تجربی دومحوره
نمونهٔ صلیبی
شبیه‌سازی اجزای محدود

چکیده

این مقاله به مطالعهٔ آزمایشگاهی و عددی شکست ورق آلیاژ آلومینیوم 5083، تحت کشش تک‌محوره و دومحوره می‌پردازد. برای بررسی رفتار شکست دومحوره، نمونه‌های کشش دومحورهٔ صلیبی، طبق مدل لیونل، به‌روش‌های ماشینکاری و الکترو-شیمیایی، ساخته شده و به‌روش قلم‌زنی الکترو-شیمیایی شبکه‌بندی شدند. یک سازوارهٔ وابسته کشش دومحوره طراحی و به‌روش‌های ماشین‌کاری، با دقت به‌نسبت بالا، ساخته شد. با استفاده از این سازوارهٔ وابسته کشش دومحوره و استقرار آن بر دستگاه کشش/ فشار تک‌محورهٔ اینسترون-1343، آزمون‌های تجربی دومحوره در دمای محیط و با نرخ کرنش متوسط 0.0003 بر ثانیه انجام شدند. شبیه‌سازی عددی رفتار شکست با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و با در نظر گرفتن شرایط آسیب، انجام شد. در این مطالعه، چگونگی آغاز و توسعهٔ شکست نمونه، موقعیت شکست روی نمونه و در مقطع آزمون آن و نمودار نیرو روی بازوهای نمونه به‌صورت کیفی و کمّی بررسی و نتایج تجربی و شبیه‌سازی مقایسه شدند. نتایج تجربی نشان می‌دهند که شکست در مرکز نمونه اتفاق نمی‌افتد. بلکه در ناحیهٔ مقطع آزمون و در راستای گوشه‌های نمونه رخ می‌دهد. در نزدیکی بازوهای نمونه و در مقطع آزمون، کرنش‌ها کمینه بوده و گرادیان تنش به‌سمت مقطع آزمون در راستای گوشه‌ها است. همبستگی بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای موقعیت بروز شکست در مقطع آزمون، چگونگی شکست در آستانه و پس از آن، و نیز نیروهای بازوها دیده شد.

Experimental and numerical studying of AL5083 alloy fracture using a cruciform specimen under biaxial loading

Farhad Farhadzadeh[1], Mehdi Salmani Tehrani[2*], Mehdi Tajdari[3]

1- Department of Marine Engineering, Malik-Ashtar University, Shahin- Shahr, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
* P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran, tehrani@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 September 2017
Accepted 22 November 2017
Available Online 15 December 2017

Keywords:
Fracture
Al. Alloy 5083-H321
Experimental Biaxial Test
Cruciform Specimen
FE Simulation

ABSTRACT

In this paper, the fracture behavior of Al.5083-H321 alloy, under uniaxial and biaxial tension loadings, is experimentally and numerically investigated. For this purpose, Lionel-type cruciform specimens were prepared, using electrochemical techniques, for biaxial tension tests. Then, the specimens were gridded by electrochemical etching method. A dependent biaxial tension mechanism was fabricated using relatively high precision machining techniques. The mechanism was then installed on an INSTRON-1343 uniaxial machine to perform biaxial tests. The tests were performed at ambient temperature and strain rate of 0.0003 sec-1. Ductile damage model in ABAQUS commercial code was used to numerically simulate the fracture behavior, during biaxial test. The experimental results show that fracture does not occur at the central zone of the specimen. Instead, the fracture initiates along the opposite-corners direction, in the test section of specimen. Furthermore, the strains are minimal near cruciform specimen arms and in the test section zone. Also, the gradient of stress is towards the test section and along the corners. In order to validate the numerical simulations, a comparison was made between experimental and numerical results of fracture initiation and development in the specimen, the location of fracture on the test section of cruciform specimen, and the force diagrams on the cruciform specimen arms. A very good correlation was observed between numerical and experimental results. This evidently shows that the simulation results are valid and can be used for predicting the fracture behavior of Al.5083-H321 alloy.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

F. Farhadzadeh, M. Salmani Tehrani, M. Tajdari, Experimental and numerical studying of AL5083 alloy fracture using a cruciform specimen under biaxial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 391-399, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]

1- مقدمه

بدون دانش کافی از فرآیند و خواص مواد، پیش‌گیری از عیوب و بهینه‌سازی فرآیندها بسیار دشوار خواهد بود. در ورق فلزی دو گونه ناهمسان‌گردی وجود دارد؛ ناهمسان‌گردی صفحه‌ای که تغییرات خواص مکانیکی را در صفحه ورق نشان می‌دهد و ناهمسان‌گردی عمودی که در مورد مقاومت فلز در ضخامت ورق نسبت به مقاومت آن در صفحه ورق به بحث می‌پردازد [1]. در فرآیند کشش عمیق، ماده تحت تنش‌های چند محوره قرار می‌گیرد. برای این‌که بتوان فرآیند موفقی داشت و کیفیت قطعه تولیدی را افزایش داد، باید از حد شکل‌پذیری ماده اطلاع حاصل نمود. برای این منظور از آزمایش کشش دومحوره استفاده می‌شود. اطلاعاتی که از آزمایش کشش تک‌محوره استخراج می‌شود شامل مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و میزان تغییرشکل ماده است. در حالت ایده‌آل این خواص و اطلاعات به‌دست آمده از کشش تک‌محوره هنگامی معتبر است که قطعه تحت تنش‌های تک‌محوره قرار گیرد. بیشتر قطعه‌های موجود در سیستم‌های مکانیکی، تنش‌های دو و یا چندمحوره را تجربه می‌نمایند. از این‌رو اطلاعات حاصل از آزمایش‌های تک‌محوره برای بیان رفتار آن‌ها مناسب نیستند. به‌طور مثال بعضی از قطعات هواپیمایی، نیروگاهی، هسته‌ای، دریایی و صنعتی تحت تنش‌های چندمحوره قرار دارند که اگر این قطعه‌ها در معرض دمای بالا قرار گیرند نمی‌توان رفتار آن‌ها را با استفاده از اطلاعات مربوط به آزمایش‌های تک‌محوره بیان نمود [2]. کرنش شکست که از آزمایش کشش تک‌محوره استخراج می‌گردد، بسیار کمتر از کرنش شکست در کشش‌های چندمحوره هستند. بنابراین اگر از اطلاعات کشش تک‌محوره در شکل‌دهی ورق‌ها استفاده گردد، تخمین شکل‌پذیری ورق بسیار اندک خواهد بود [3]. برای نزدیک‌تر شدن شرایط آزمایش به شرایط کارکرد قطعه در حالت‌های واقعی، آزمایش دومحوره مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این آزمایش نمودار تنش-کرنش در جهت‌های مختلف قابل استخراج است [2]. آزمایش کشش دومحوره با استفاده از نمونهٔ صلیبی شکل، یک آزمایش مناسب برای درک رفتار ماده تحت تنش‌های دومحوره در حالت‌های مختلف است. برای ایجاد حالت‌های مختلف تنش از اعمال تغییر مکان یا نیروهای متفاوت در دو انتهای نمونهٔ صلیبی شکل استفاده می‌گردد [2]. علاوه بر این، آزمایش کشش تک‌محوره برای مواد همسان‌گرد معتبر است. در حالی که یک ورق نازک هنگامی که عملیات نورد بر روی آن انجام گردد، اثرهای ناهمسانگردی در خواص کششی آن به وجود می‌آید [4]. مواد ناهمسانگرد زمانی که تحت آزمایش کشش دومحوره قرار می‌گیرند، به علت وجود ناهمسانگردی در جهت‌های ضعیف‌تر دچار واماندگی می‌گردند [5].

از جمله آزمایش‌هایی که برای ایجاد حالت تنش دومحوره معرفی شده‌اند، می‌توان به آزمایش‌های هیدرواستاتیک، سنبه و ماتریس و مارسینیاک اشاره نمود [5-7]. پیش از این در آزمایش‌ها، بارگذاری به‌صورت خارج از صفحه صورت می‌پذیرفت. به‌همین دلیل در ورق خمش ایجاد می‌گردید که تعیین خواص ورق دچار خطا می‌شد. به‌همین منظور پژوهش‌گران تمرکز خود را بر روی آزمایش‌هایی گذاشتند که در آن‌ها بتوانند نمونه را به‌صورت درون صفحه‌ای بارگذاری نمایند و اثرات خمش را از بین ببرند. آزمایشی که مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته، استفاده از نمونه‌های صلیبی است [8-10]. این نمونه‌های صلیبی، ترکیبی از آزمایش کشش تک‌محوره در دو راستای عمود بر هم است. برخلاف نمونه کشش تک‌محوره که دارای استاندارد[1]، برای تعیین ابعاد آن است، نمونهٔ کشش صلیبی برای آزمایش کشش دومحوره در حالت شکست دارای استاندارد خاصی نیست [2].

بنابراین از شبیه‌سازی اجزای محدود برای تعیین بهینهٔ ابعاد نمونه با توجه به نوع دستگاه کشش، ضخامت ورق، جنس ورق و غیره باید بهره برد. دمرله و بوهلر، برای یک ورق با دو ضخامت 7 و 13 میلی‌متر ابعاد این نمونه را بهینه نمودند [8]. فدی و همکاران، نیز ابعاد بهینه‌ای را برای نمونهٔ صلیبی ارائه نمودند که نسبت به ابعاد ارائه شده توسط دمرله و بوهلر، از عمومیت بیشتری برخوردار است [11]. موضوعی که در مواد ناهمسانگرد باید مورد توجه قرار گیرد، عدم تطابق محورهای کرنش اعمالی با محورهای کرنش اصلی است. این موضوع سببمی‌شود گرادیان تنش برشی در نمونه ایجاد گردد. برای غلبه بر این مشکل پژوهش‌گران از بارگذاری‌هایی با عنوان "خارج از محور" برای تنش‌های تک‌محوره استفاده نموده‌اند. دمرله و بوهلر اشاره نمودند که نمونهٔ بهینه شده برای مواد همسان‌گرد و بارگذاری نمونه در حالتی که بازوهای نمونه به‌صورت کاملاً صلب به دستگاه کشش متصل شده باشند، نتایج معقولی را نیز برای مواد ناهمسانگرد می‌توان ایجاد نمود [8]. لیونل و همکاران ، ابعاد مشخص دیگری را برای نمونه صلیبی ارائه نمودند [7]. آن‌ها نیز از این نمونه برای آزمایش مواد همسانگرد و ناهمسانگرد استفاده کردند و اشاره نمودند که این ابعاد می‌تواند تمام مسیرهای کرنش را ایجاد و تنش بیشینه نیز در همان وسط نمونه باقی بماند، بدون این‌که بازوها دچار پارگی شوند. در این تحقیق از نمونهٔ لیونل برای بررسی شکست آلیاژ آلومینیوم 5083 استفاده شده‌است.

برای انجام آزمایش‌های دومحوره، پژوهش‌گران دستگاه‌های مختلفی طراحی کرده‌اند که آن‌ها را می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی نمود: (1) دستگاه‌های کشش دومحوره مستقل و (2) دستگاه‌های کشش دومحوره وابسته (دارای عضوهای میله‌ای ارتباطی). در دستگاه‌های کشش دومحوره مستقل، نیرو و تغییر مکان به طور مستقل به بازوها، در راستای دو محور عمود بر هم اعمال می‌گردند. مکیند و همکاران در سال 1992 دستگاهی بدین منظور ابداع کردند [2]. از دیگر دستگاه‌ها می‌توان به دستگاه‌های ابداع شده توسط بوهلر و همکاران، و کوبارا و همکاران، اشاره نمود [12,8]. مسألهٔ مهم در طراحی این دستگاه‌ها چگونگی اعمال نیروی هر یک از بازوها به نمونه صلیبی است. پژوهش‌گران سعی نمودند تا در طراحی‌های خود از اعمال نیروی خمشی به نمونهٔ صلیبی ناشی از بازوها جلوگیری نمایند. یکی از تفاوت‌های مهم این طراحی‌ها، چگونگی بسته شدن نمونهٔ صلیبی در دستگاه است. دستگاه‌هایی که نمونه را به‌صورت عمودی تحت بارگذاری قرار می‌دهند. مانند دستگاه طراحی شده توسط بوهلر و همکاران دارای مزیت در استفاده نسبت به دیگر دستگاه‌ها هستند. زیرا در این دستگاه‌ها مطالعه میدان کرنش در نمونه صلیبی و اعمال گرما آسان‌تر می‌باشد.

در مجموع دستگاه‌های کشش دومحوره مستقل تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. این دستگاه‌ها از لحاظ قیمت تمام شده برای ساخت دارای قیمت بالایی هستند. قیمت بالای این دستگاه‌ها محققین را بر آن داشت تا دستگاه کشش دومحوره وابسته را طراحی نمایند. در این دستگاه‌ها حرکت و نیرو در یک راستا به حرکت و نیرو در راستای دیگر مرتبط می‌شود. برای ایجاد مسیرهای کرنش متفاوت در نمونه صلیبی، هنگام ارتباط نیرو و تغییر مکان در یک راستا به راستای دیگر با تغییر طول عضوهای میله‌ای ارتباطی تبدیل‌هایی صورت می‌پذیرد تا حرکت در یک محور ضریبی از حرکت محور دیگر باشد. بنابراین حرکت در یک راستا از این دستگاه‌ها به دستگاه کشش-فشار متصل گردیده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این موضوع باعث می‌شود که هزینه تمام شده ساخت این دستگاه‌ها کاهش یافته، ولی مشکلی که پیش می‌آید آن است که تعداد مسیرهای کرنش ایجاد شده محدود می‌گردد. فرون و مکیند در سال 2008 طرحی با هشت عضو میله‌ای ارائه نمودند [2].

[1] ASTM E8/E8M – 13a

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]

فرانهافر در سال 2005، بریو و همکاران در 2006، وزر و مجور در 2004، فدی و همکاران در 2007، و کواک و همکاران در 2008، دستگاه‌های کشش دومحوره وابسته مختلفی را طراحی نمودند [14,13,11,5,2].

در این مقاله برای کاهش هزینه‌های ساخت و آزمون‌های بارگذاری دومحوره با استفاده از نمونه‌های صلیبی لیونل، سازوارهٔ کشش دومحوره وابسته‌ای طراحی و ساخته شد. این دستگاه نسبت به دستگاه‌های طراحی شده تاکنون اندکی تفاوت داشته و با استفاده از دستگاه کشش-فشار تک‌محوره، ساخت شرکت اینسترون[1] به‌کار گرفته می‌شود. آزمون‌های تک‌محوره با استفاده از دستگاه کشش تک‌محوره سنتام[2] انجام شدند. نمونه‌ها طبق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام[3] در سه جهت صفر، 45 و 90 درجه نسبت به راستای نورد ساخته و تحت شرایط دومحوره از لحاظ نرخ کرنش و دما تجربه شده‌اند. پس از انجام آزمون‌های تک‌محوره و دومحوره به‌وسیلهٔ روش اجزای محدود و با نرم‌افزار آباکوس[4] شبیه‌سازی‌های مربوطه انجام گرفته‌اند و صحت شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند.

2- نمونهٔ صلیبی

یکی از بحث برانگیزترین قسمت‌ها در آزمایش کشش دومحوره طراحی هندسهٔ نمونهٔ صلیبی است. این نمونه می‌تواند از یک استوانهٔ ساده یا یک دیسک که در/روی آن‌ها فشار هیدرواستاتیک اعمال می‌گردد، تا نمونه‌های صلیبی شکل با طراحی‌های مختلف در محل تقاطع دومحور، تشکیل شوند. نمونه‌های صلیبی مورد استفاده توسط پژوهش‌گران دارای شکل واندازه‌های متفاوتی هستند. هدف اصلی پژوهش‌گران، ایجاد تنش دومحوره خالص درون ناحیه مؤثر کشش است. به‌گونه‌ای که درون ناحیه مؤثر کشش، گرادیان تنش برشی کمینه شود تا حالت تنش دومحوره خالص ایجاد شود. بوهلر نشان داد اگر گرادیان تنش‌های برشی به‌وجود آیند، اگرچه کوچک باشند، محورهای تنش اصلی قابل شناسایی نبوده و استخراج معادلهٔ ماده از نتایج آزمایش نامعتبر خواهد بود [8]. پژوهشگران به‌دنبال این موضوع بوده‌اند که این حالت تنش دومحوره در وسط نمونه ایجاد گردد، بدون اینکه در نواحی دیگر نمونهٔ صلیبی تنشی بیشتر از مقدار موجود در وسط نمونه ایجاد شود. این موضوع به این دلیل است که ظرفیت شکل‌پذیری نمونه و کرنش شکست، در حالت تنش تک‌محوره بسیار کمتر از حالت تنش دومحوره باشد. بنابراین سعی بر آن است تا از پارگی بازوهای نمونهٔ صلیبی قبل از پارگی ناحیه مؤثر کشش در وسط نمونه جلوگیری شود [10]. برخلاف نمونهٔ کشش تک‌محوره که دارای استاندارد ای‌اس‌تی‌ام برای تعیین ابعاد آن است، نمونهٔ کشش صلیبی برای آزمایش کشش دومحوره در حالت شکست دارای استاندارد خاصی نیست [2]. ولی برای حالت تسلیم می‌توان از استاندارد ایزو 16842[5] استفاده نمود. بنابراین برای تعیین ابعاد بهینهٔ نمونه و بررسی شکست دومحوره، با توجه به نوع دستگاه کشش، ضخامت و جنس ورق، باید از شبیه‌سازی اجزای محدود بهره برد.

"شکل 1" نمونهٔ صلیبی لیونل که برای بررسی شکست طراحی شده را نشان می‌دهد. طراحی این نمونه برای آزمون‌های کشش دومحوره بهینه شده است. ساختار این نمونه به‌گونه‌ای است که گرادیان تنش به سمت مرکز نمونه (مرکز مقطع آزمون) باشد و شکست در ناحیهٔ مقطع آزمون با هر نسبت بارگذاری رخ دهد. اگر بررسی تسلیم ماده در کشش دومحوره مورد نظر باشد باید از نمونهٔ دنگ یا کوابارا استفاده نمود [15]. ساختار نمونهٔ صلیبی برای حالت تسلیم با مدل لیونل کاملاً متفاوت است. نمونهٔ لیونل از ورق آلیاژ آلومینیوم 5083[6] با ضخامت چهار میلی‌متر، ابتدا با واتر جت برش خورده، سپس با استفاده از فرزکاری ناحیهٔ مقطع آزمون آن ماشین‌کاری شد. آن‌گاه شیارهای بازوها با استفاده از برش سیم ایجاد شدند. در انتها عملیات ایجاد شبکه روی سطح صاف نمونه به‌روش شبکه‌بندی الکتروشیمیایی[7] اجرا شد. شبکه‌بندی با دایره‌هایی به قطر پنج میلی‌متر انجام شدند.

برای اندازه‌گیری ناهمسان‌گردی در ورق فلزی، آزمون‌های تک‌محوره در راستاهای صفر، 45 و 90 درجه نسبت به راستای نورد ورق انجام شده‌اند. نمونه‌های تک‌محوره موردنیاز براساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام ساخته شده‌اند. ورق این نمونه‌ها نیز ابتدا با استفاده از جت آب[8] و سپس با استفاده از روش الکتروشیمیایی[9] برش خورده‌اند.

3- چیدمان آزمایشگاهی

آزمون‌های کشش تک‌محوره با استفاده از دستگاه سنتام-250 انجام شد. قبل از انجام آزمون‌ها این دستگاه توسط تنظیم‌کنندهٔ[10] مخصوص تنظیم می‌شود.

برای انجام آزمون‌های دومحوره با استفاده از نمونه‌های صلیبی لیونل، و با توجه به امکان دسترسی به دستگاه آزمون کشش- فشار تک‌محوره شرکت اینسترون یک سازواره کشش دومحوره وابسته مطابق "شکل 2" طراحی و ساخته شده‌است. در این چیدمان آزمون، اجزاء زیر به‌کار برده شده‌اند:

- دستگاه کشش-فشار اینسترون-1343 با ظرفیت بارگذاری 50 تن و کمترین سرعت فک تا 0.5 میلی‌متر بر دقیقه؛
- نمونهٔ صلیبی مطابق با مدل لیونل؛
- نیروسنج‌های S-شکل ساخت شرکت زمیک آلمان[11]، روی بازوهای عمود بر هم سازواره؛
- دوربین یا میکروسکوپ دینولایت[12]؛
- گرمکن الکتریکی با توان تولید گرما تا 600 درجهٔ سانتی‌گراد؛
- دماسنج لیزری جهت اندازه‌گیری دمای نمونه در هنگام گرم کردن آن؛

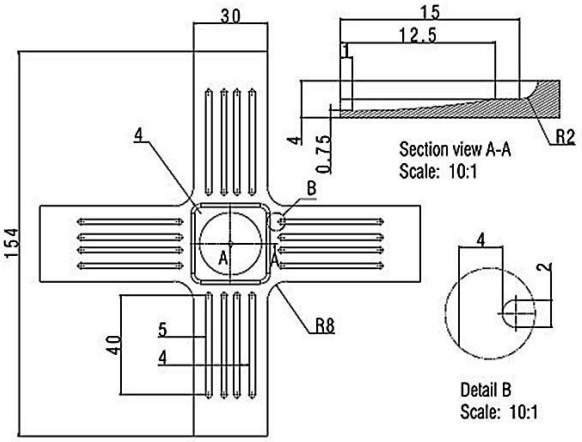


Fig. 1 The Lionel cruciform specimen for considering material fracture behavior [7, 16]

شکل 1 نمونه صلیبی لیونل برای بررسی رفتار شکست ماده [7, 16]

[1] INSTRON
[2] SANTAM- STM- 250
[3] ASTM- E8/E8M- 13a
[4] ABAQUS 6.14
[5] ISO16842

[6] Al. alloy 5083-H321
[7] Etching
[8] Water Jet cutting
[9] Wire cut
[10] Calibrator
[11] ZEMIC(Code: H3- C3- 10t- 6B- D55)
[12] Dino lite microscope- Type: AM 7013 MZI(R4)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]

در "شکل 2" این اجزا نشان داده شده‌اند. نحوهٔ قرار گرفتن نمونهٔ صلیبی در مکانیزم کشش دومحوره به گونه‌ای است که ناحیه فرورفته در مدل به‌سمت پایین و مقابل گرمکن قرار می‌گیرد و سطح دیگر که صاف است و شبکه‌بندی شده است رو به بالا می‌باشد تا دوربین مقابل آن قرار گیرد و بتوان به‌راحتی از کرنش و تغییر کرنش آن تصویربرداری و فیلم‌برداری نمود. شبکه بندی روی سطح مسطح نمونه صلیبی در ناحیه مقطع آزمون دایره‌هایی با قطر پنج میلی‌متر بوده و برای تصویربرداری اندازهٔ توپر توسط نرم‌افزار مربوطه و دوربین تنظیم می‌شود.

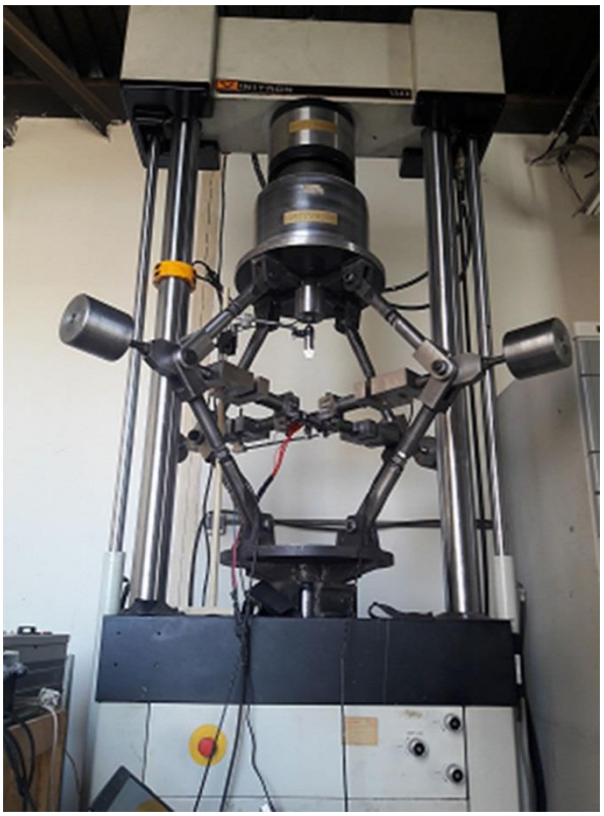


Fig. 2 The dependent biaxial tension mechanism based on INSTRON-1343 uniaxial tension machine

شکل 2 سازواره کشش دومحورهٔ وابسته، نصب شده روی دستگاه تست کشش-فشار تک‌محوره و اجزا آن



Fig. 3 The method of fixing a cruciform specimen based on the dependent biaxial tension mechanism

شکل 3 نحوه استقرار نمونه صلیبی روی سازوارهٔ کشش دومحوره

در سازوارهٔ کشش دومحوره ساخته شده، دو عدد نیروسنج الکتریکی به‌کار رفته که هر کدام در راستای یک بازو از نمونه صلیبی نصب شده‌اند. جهت ایجاد شرایط توزیع وزنی مناسب، در طرف مقابل هر بازو یک قطعه به شکل نیرو سنج الکتریکی ساخته و نصب شده‌است. وزن هر نیروسنج الکتریکی حدود ده کیلوگرم می‌باشد. از آن‌جایی که نباید روی نمونهٔ صلیبی خمش ایجاد گردد، در سازواره طراحی شده وزنه‌های تعادلی جهت تعادل وزنی نیروسنج‌ها، قطعات ساخته‌شده و گیره‌ها و غیره تعبیه شده‌اند. هم‌چنان که در "شکل 2" دیده می‌شود از این وزنه‌های تعادلی چهار عدد به‌کار رفته است. قبل از نصب نمونه صلیبی روی سازواره کشش دومحوره با امکان جابجائی وزنه‌های تعادلی به‌صورت پیچی می‌توان وزن گیره‌های نمونه، میله‌های ارتباطی، و نیروسنج‌های الکتریکی یا قطعات شبیه نیروسنج‌ها را حول لولای مربوطه موازنه وزنی نمود.

"شکل 3" نحوهٔ قرارگیری نمونهٔ صلیبی در سازوارهٔ کشش دومحوره را نشان می‌دهد.

جهت تنظیم نمودن نیروسنج‌های مورد استفاده در سازوارهٔ کشش دومحوره، قبل از نصب آن‌ها روی سازوارهٔ مربوطه، با بارگذاری روی آن‌ها در دستگاه کشش و فشار تنظیم انجام گرفت. در بارهای کمتر دقت نیروسنج‌ها بیشتر بود. براساس این بارگذاری، نرم‌افزار و برنامه‌های مربوط به نیروسنج‌ها تنظیم گردیدند.

4- نتایج آزمون‌های تجربی

4-1- نتایج آزمون‌های تک‌محوره

برای بررسی ناهمسان‌گردی ورق باید آزمون‌های تک‌محوره در راستاهای صفر، 45 و 90 درجه نسبت به راستای نورد انجام شوند. این آزمون‌ها به‌وسیلهٔ دستگاه سنتام-250 و با توجه به استاندارد ای‌اس‌تی‌ام انجام گرفته، نتایج به‌صورت نمودارهای "شکل 4" ارائه شده‌اند. در "شکل 4" یعنی نمودار کشش تک‌محوره آلیاژ آلومینیوم 5083 یک ناپیوستگی سیلانی مشاهده گردید. ناپیوستگی سیلانی در آلیاژهای آلومینیوم معمولاً همراه با پدیده‌های مرتبط با سازواره‌های پیر شدن دینامیک[1] به‌وجود می‌آید [17]. از جمله می‌توان به ایجاد نوارهای تغییرشکل در سطح نمونه یا منفی شدن ضریب حساسیت به کرنش ماکروسکوپی اشاره کرد که از مشخصات اثر پورتوین-لوشاتولیه[2] است [18]. ایجاد هر یک از دندانه‌ها در نمودار تنش-کرنش، در اثر ایجاد یک نوار تغییرشکل در طول نمونه است. در واقع، ناپیوستگی سیلانی در اثر از دست رفتن ناگهانی چقرمگی نمونه و ناصاف شدن سطح آن ایجاد می‌شود. در داخل نمونه نیز در اثر تعامل بین ابر متحرک ناخالصی‌ها با نابه‌جایی‌های صعودکنندهٔ دی‌اس‌ای، اثر پی‌ال‌سی را ایجاد می‌کند [17, 18].

با توجه به این‌که نمودارهای "شکل 4" نمودارهای تنش‌مهندسی-کرنش مهندسی هستند و در نرم‌افزارهای اجزای محدود قابل کاربرد نیستند، بایستی آن‌ها را به نمودارهای تنش‌حقیقی-کرنش پلاستیک تبدیل نمود. از این‌رو "شکل 5" نمودارهای تنش حقیقی-کرنش پلاستیک را در این سه جهت نشان می‌دهد. با استفاده از فرض 0.2 درصد خارج از مرکز، تنش‌های تسلیم برای هر حالت از نمونه‌های کشش ساده به‌دست آمده‌اند. بر این اساس مقادیر تنش‌های تسلیم به‌صورت رابطه‌های (1) هستند.

$$\sigma_0 = \sigma_{RD} = 166\ (\text{Mpa})$$
$$\sigma_{45} = 185\ (\text{Mpa})$$
$$\sigma_{90} = \sigma_{90} = 158\ (\text{Mpa}) \qquad (1)$$

[1] Dynamic Strain Aging (DSA)
[2] Portevin-Le Chatelier (PLC)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]

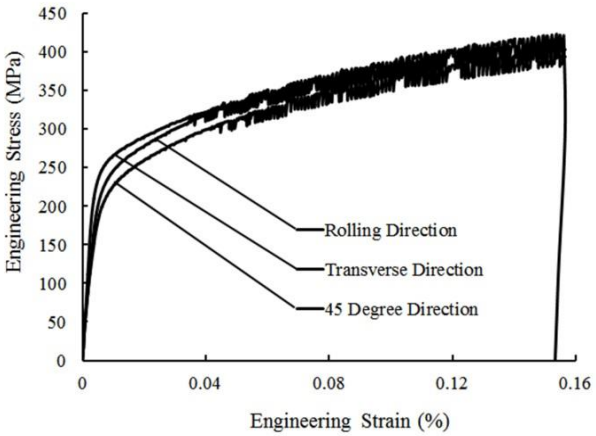


Fig. 4 The curves of engineering stress-strain for Al. alloy 5083 at ambient temperature and strain rate 0.0003 per second at directions of 0, 45, and 90 degree related to rolling direction

شکل 4 نمودارهای تجربی تنش مهندسی-کرنش مهندسی تک‌محوره، برای آلیاژ آلومینیوم 5083 در دمای محیط و نرخ کرنش 0.0003 بر ثانیه در سه راستای صفر، 45 و 90 درجه نسبت به راستای نورد

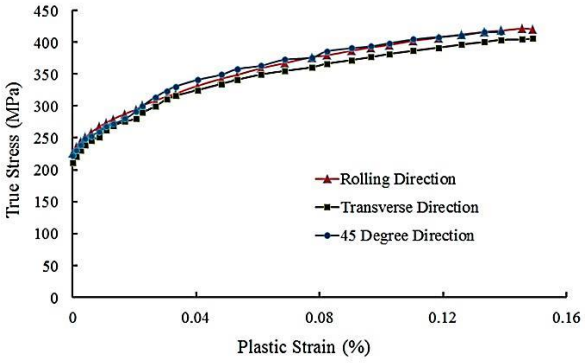


Fig. 5 The curves of true stress-plastic strain for Al. alloy 5083 at ambient temperature and strain rate 0.0003 per second at directions of 0, 45, and 90 degree related to rolling direction

شکل 5 نمودارهای تجربی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک تک‌محوره، برای آلیاژ آلومینیوم 5083 در دمای محیط و نرخ کرنش 0.0003 بر ثانیه در سه راستای صفر، 45 و 90 درجه نسبت به راستای نورد

4-2-نتایج آزمون‌های دومحوره

با توجه به چیدمان "شکل 2" آزمون‌های دومحوره در حالت دومحورهٔ مساوی انجام شده‌اند. بدین معنی که طول عضوهای میله‌ای سازواره هم‌اندازه بوده و به بازوهای نمونهٔ صلیبی جابه‌جایی‌های یکسان وارد شده‌اند. آزمون تجربی انجام شده در دمای محیط بوده و سرعت فک دستگاه نیز روی یک میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده است. علاوه بر این‌که در این آزمون، نمودار بار برحسب جابجائی دستگاه آزمون کشش- فشار اینسترون اندازه‌گیری شده است، توسط نیروسنج‌های الکتریکی مستقر در سازوارهٔ کشش دومحوره، نیز نیروهای ایجاد شده در بازوهای نمونه صلیبی اندازه‌گیری شده‌اند. نمودارهای مربوط به این نیروها به‌صورت "شکل 6" می‌باشند. حداکثر اختلاف نسبی بین دو نمودار "شکل 6" حدود 14.9 درصد می‌باشد و در ناحیه نزدیک به قلهٔ این دو نمودار بر هم منطبق می‌باشند. "شکل 7" نمودار نیرو-جابه‌جایی دستگاه کشش- فشار اینسترون را که اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.

در صورتی که مقدار بیشینهٔ نیروها از نمودارهای "شکل‌های 6 و 7" در نظر گرفته شوند مقدار خطای نسبی برای این دو حدود 9.2 درصد است. این

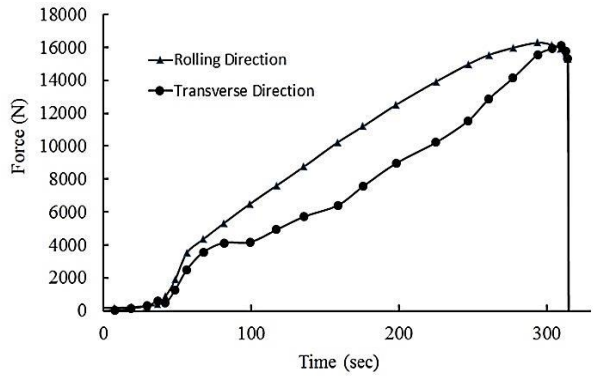


Fig. 6 The obtained force-time curve from two load cells based on cruciform specimen arms

شکل 6 نمودارهای نیرو-زمان نیروسنج‌های الکتریکی نصب‌شده روی مکانیزم کشش دومحورهٔ وابسته

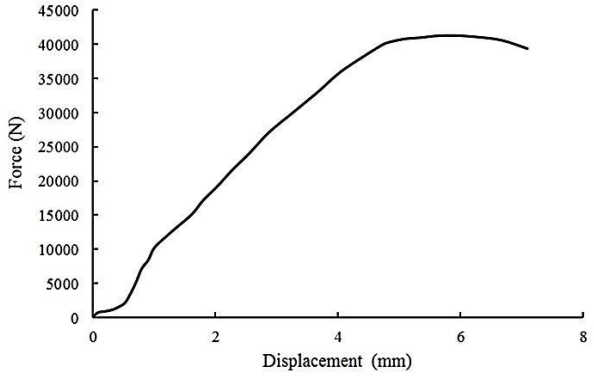


Fig. 7 The obtained force-displacement curve from INSTRON-1343 machine

شکل 7 نمودار نیرو-جابه‌جائی دستگاه کشش-فشار اینسترون-1343

میزان خطا را می‌توان به اصطکاک بین مفاصل سازواره دومحوره، انحراف‌های احتمالی، تغییر زاویه عضوهای میله‌ای و غیره نسبت داد.

"شکل 8" شکست نمونه را پس از اعمال بار، به‌صورت جابه‌جایی و نیز به‌صورت دومحورهٔ مساوی، نشان می‌دهد. هم‌چنان که از "شکل 8" دیده می‌شود گوشه‌های نمونه، جاهایی که شکست رخ نداده، حالت چروکیدگی وجود دارد. البته این حالت به‌دلیل نازک شدن نمونه در اثر گلوئی شدن به‌وجود می‌آید. در مسیر شکست این شرایط نیز وجود دارد اما در نمونه "شکل 8" به‌دلیل پارگی چندان مشهود نیست. بروز ترک یا پارگی معمولاً از یک نقطه آغاز می‌گردد. شاید در نگاه اولیه انتظار پارگی نمونه از ناحیهٔ مقطع آزمون به‌صورت × باشد. ولی در عمل و در تئوری که پیش‌تر بدان پرداخته می‌شود چنین نخواهد بود و رشد آسیب به‌گونه‌ای است که در نهایت در امتداد یک قطر از مقطع آزمون اتفاق می‌افتد.

به‌دلیل این‌که نمونهٔ صلیبی لیونل در راستای ضخامت دارای تقارن نمی‌باشد، بهنگام بارگذاری بصورت جابه‌جایی، ناحیه مرکز مقطع آزمون، یعنی دایره ضخامت ثابت در مرکز مقطع آزمون با قطر دو میلی‌متر، به‌سمت محل تقاطع محورهای بارگذاری کشیده می‌شود. در ساختار این نمونه شاید این موضوع یک نقص و محلی برای بروز خطا در نتایج تجربی و عددی باشد.

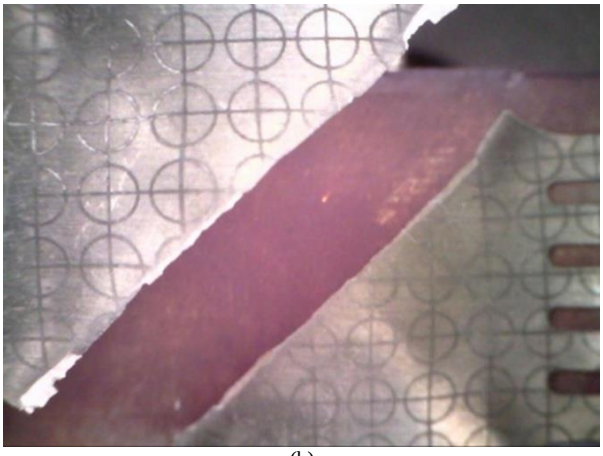
"شکل 9" روند شکست نمونهٔ صلیبی تحت کشش دومحورهٔ مساوی را نشان می‌دهد. در "شکل 9-a" تغییر شکل پلاستیک به شکل × از گوشه‌های مقطع آزمون رخ داده‌است و مشاهده می‌شود که در نواحی نزدیک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]

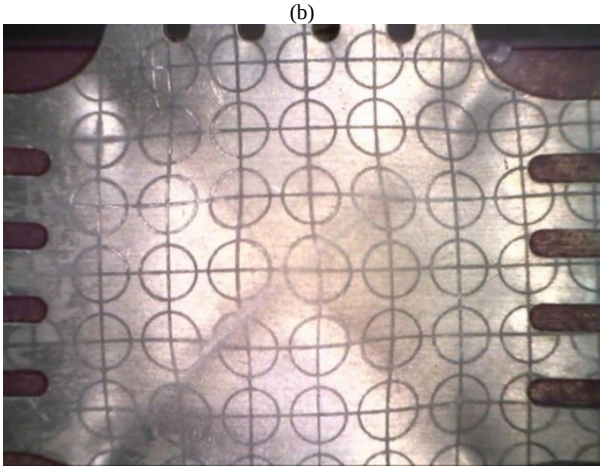


Fig. 8 The cruciform specimen fracture from Al. alloy 5083

شکل 8 شکست نمونه صلیبی از آلیاژ آلومینیوم 5083



(b)



(a)

Fig. 9 The Image of specimen fracture process from Al. alloy 5083 by using Dino lite microscope

شکل 9 تصویر روند شکست نمونهٔ صلیبی از آلیاژ آلومینیوم 5083 با استفاده از میکروسکوپ دینولایت

به بازوها روی محورهای تقارن نمونهٔ صلیبی، تغییرشکل‌ها بسیار اندک می‌باشند. از طرفی "شکل 9-a" آغاز شکست در ناحیهٔ مقطع آزمون را نشان می‌دهد. شکست از جائی آغاز می‌شود که مقطع آزمون دارای ضخامت متغیر می‌باشد. در وسط مقطع آزمون نمونهٔ صلیبی، با توجه به "شکل 1" یک ناحیه به قطر دو میلی‌متر با ضخامت ثابت 0.75 میلی‌متر وجود دارد. بعد از آن تا شعاع 12.5 میلی‌متر به‌صورت دایره‌ای و با مقطع غیرخطی تا دو میلی‌متر تغییر می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود که در آزمون‌های تجربی و در تحلیل‌های عددی اجزای محدود، شکست در این ناحیه که تغییر ضخامت دارد اتفاق افتد و نه از مرکز مقطع آزمون. در آزمون حاضر این تصور به یقین تبدیل شده است. البته آزمون‌های تجربی تکرار شده‌اند و نتیجه برای همه آن‌ها مشابه بوده‌اند. "شکل 9-b" نیز رشد آسیب و چگونگی شکست نمونهٔ صلیبی را بطور کامل بیان می‌نماید. توجه به این نکته اهمیت دارد که در "شکل 9" راستای افقی از دید ناظر، راستای نورد و راستای عمودی از دید ناظر، راستای عرضی هستند.

5- تحلیل‌های عددی

شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده‌اند. "شکل 10" نمونهٔ صلیبی لیونل را به‌صورت قسمت‌بندی شده، در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که در نمونهٔ موردنظر آسیب یا پارگی در یک نقطه، در محل مقطع آزمون نمونه، رخ می‌دهد از مدل‌سازی نمونهٔ به‌صورت متقارن محوری پرهیز شده است. بارگذاری به‌صورت اعمال جابه‌جایی روی هر دو بازوی مقابل از نمونهٔ صلیبی انجام گرفته است. در این‌جا حالت کشش دومحورهٔ مساوی مورد نظر است. خواص مکانیکی مربوط به آلیاژ آلومینیوم 5083 در جدول 1 ارائه شده‌اند.

برای خواص ناهمسان‌گردی ماده می‌توان از رابطه‌های استاندارد بین‌المللی ای‌اس‌تی‌ام[1] (رابطه‌های (2) و (3)) استفاده نمود [20, 19].

$$r_{(x)^\circ} = \frac{\varepsilon_{w(x)^\circ}}{\varepsilon_{t(x)^\circ}} \quad (2)$$

$$R = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (3)$$

$$\Delta R = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2r_{45^\circ}}{4} \quad (4)$$

$r_{(x)^\circ}$ نسبت کرنش در راستای x، ε_w و ε_t به‌ترتیب کرنش عرضی و ضخامتی نمونه، R ناهمسان‌گردی عمودی[2] و ΔR ناهمسان‌گردی صفحه‌ای[3]

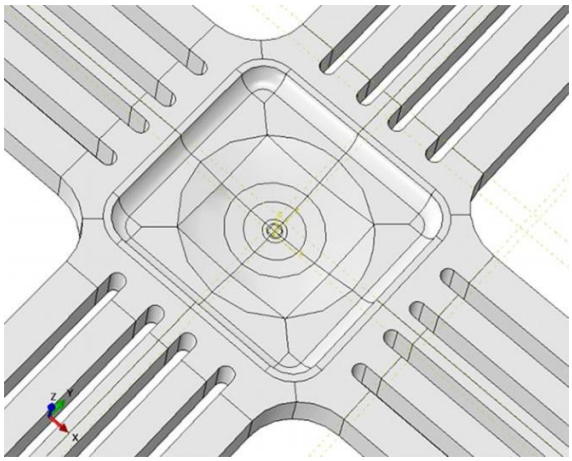


Fig. 10 The cruciform specimen partition in ABAQUS software; the *x* axis is rolling direction and *y* axis is transverse direction

شکل 10 مدل قسمت‌بندی شده نمونهٔ صلیبی در نرم‌افزار آباکوس، محور x راستای نورد و محور y راستای عرضی هستند.

[1] ASTM E517-00
[2] Normal anisotropy
[3] Planar anisotropy

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]

جدول 1 برخی خواص مکانیکی ورق از آلیاژ آلومینیوم 5083 که از آزمون‌های کشش تک‌محوره به‌دست آمده‌اند.

Table 1 The some mechanical properties of Al. 5083 alloy, obtained from experimental uniaxial tests

خواص	زاویه نسبت به راستای نورد		
	90 درجه	45 درجه	صفر درجه
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	2670	2670	2670
نسبت پواسون	0.33	0.33	0.33
مدول یانگ (گیگا پاسکال)	68.56	62.84	68.56
تنش تسلیم (مگا پاسکال)	215	220	225
تنش کششی نهایی (مگا پاسکال)	414	415.8	420.5

را نشان می‌دهند. هرچند مقدار r نسبت کرنش پهنا به ضخامت ورق نمونه را بیان می‌کند، ولی ε_t بدلیل نازکی ورق به‌آسانی قابل اندازه‌گیری نیست. از این‌رو کرنش‌های طولی و عرضی اندازه‌گیری شده و با استفاده از اصل حجم-ثابت در تغییرشکل پلاستیک، کرنش در راستای ضخامت به‌دست می‌آید.

$$\varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0\ ; \qquad \varepsilon_t = -(\varepsilon_l + \varepsilon_w) \tag{5}$$

ε_l کرنش طولی یا در راستای نورد است. برای بیان ناهمسان‌گردی در نرم‌افزار آباکوس باید ضریب‌های ناهمسان‌گردی تعیین شوند این ضریب‌ها با استفاده از رابطه‌های (6) محاسبه می‌شوند.

$$R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1$$
$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0+1)}{r_0(r_{90}+1)}}$$
$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0+1)}{r_0+r_{90}}}$$
$$R_{12} = \sqrt{\frac{3r_{90}(r_0+1)}{(2r_{45}+1)(r_0+r_{90})}} \tag{6}$$

مقدارهای محاسباتی ضریب‌های ناهمسان‌گردی براساس داده‌های تجربی کشش تک‌محوره برای تحلیل عددی به‌شرح جدول 2 هستند.

نتایج آزمون‌های تجربی بسیاری از مواد نشان می‌دهند که نمودارهای تنش حقیقی- کرنش پلاستیک در جهات عرضی و ضخامت تقریباً برهم منطبق هستند [21-23] و حدود پنج تا ده درصد کمتر از حالت نورد هستند. از این‌رو برای انجام محاسبات و تعریف داده‌ها به نرم‌افزار اجزای محدود فرض شده که در راستای ضخامت همان شرایط عرضی حاکم باشد. در شبیه‌سازی‌ها، به‌دلیل بروز شکست در یک نقطه از مقطع آزمون، کل نمونه مدل شده است و قیدهای تقارن در نظر گرفته نشده‌اند. رفتار الاستیک-پلاستیک ماده به‌صورت جدول و ضرایب هیل برای در نظر گرفتن اثر ناهمسان‌گردی در تسلیم و آسیب نرم است، که خود دو بخش شروع آسیب[1] و گسترش آسیب[2] را شامل می‌شود.

6- نتایج عددی

"شکل 11" منحنی نیرو-جابه‌جایی را در راستاهای نورد و عرضی نشان می‌دهد. اختلاف نسبی در نیروی بیشینه در این شکل هنگام پارگی ماده 9.2 درصد است.

"شکل 12" برآیند این دو نیرو را با توجه به نوع ارتباط اعضای سازواره کشش دومحوره، نشان می‌دهد. نمودارهای عددی "شکل 12" در واقع برآیند "شکل 11" بوده که از ساختار سازواره کشش دومحوره به‌دست آمده است.

[1] Damage initiation
[2] Damage propagation

جدول 2 مقادیر محاسباتی برمبنای نتایج تجربی برای ضرایب ناهمسان‌گرد در تحلیل عددی اجزای محدود

Table 2 The calculated amounts based on experimental results for anisotropic coefficients in FEM analysis

متغیرهای ناهمسان‌گردی	R_{11}	R_{22}	R_{33}	R_{12}	R_{13}	R_{23}
مقدار	1	0.9218	1.0726	0.9654	1	1

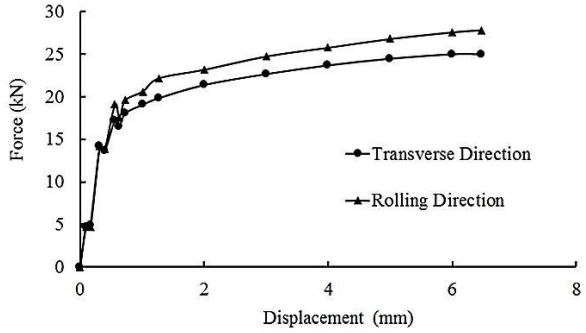


Fig. 11 The obtained force-displacement diagram from numerical analysis in RD and TD directions

شکل 11 منحنی نیرو-جابه‌جایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی در راستاهای نورد و عرضی

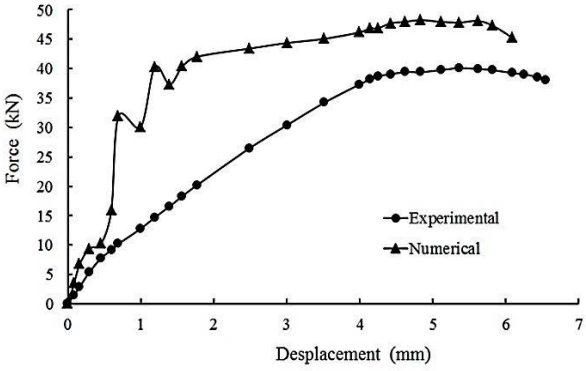


Fig. 12 The comparison of experimental and numerical results in INSTRON machine

شکل 12 مقایسهٔ نیروهای تجربی و عددی در دستگاه اینسترون

اختلاف نسبی بین نیروی بیشینهٔ اندازه‌گیری شده از دستگاه اینسترون با حداکثر نیروی محاسباتی به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی حدود 13.3% است.

"شکل 13" در واقع همان تصاویر "شکل 9" بوده با این تفاوت که از نتایج عددی حاصل شده‌است. "شکل 13-a" توزیع معیار شکست نرم را به‌هنگام بارگذاری نشان می‌دهد. در این شکل گرادیان تنش به‌سمت مقطع آزمون بوده و نمونه در مقطع آزمون خود، در مسیر مرکز به سمت گوشه‌ها، نسبت به تنش حساسیت نشان می‌دهد. با افزایش بارگذاری این حساسیت افزایش یافته است. به‌گونه‌ای که بروز آسیب در جزء نشان داده شده، مشاهده می‌شود. با افزایش بارگذاری از نقطه آسیب دیده، شکست به‌سمت گوشه‌های نمونه اتفاق می‌افتد. توسعه یا گسترش شکست در "شکل 13-b" نشان داده شده است. در "شکل 13-b"، آسیب، رشد و گسترش می‌یابد. مسیر گسترش آسیب یا پارگی به‌صورت "شکل 9-b" در راستای گوشه به گوشهٔ مقطع آزمون نمونهٔ صلیبی است. به‌صورت ظاهری همبستگی خوبی بین نتایج تجربی و عددی "شکل‌های 9 و 13" دیده می‌شود.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]

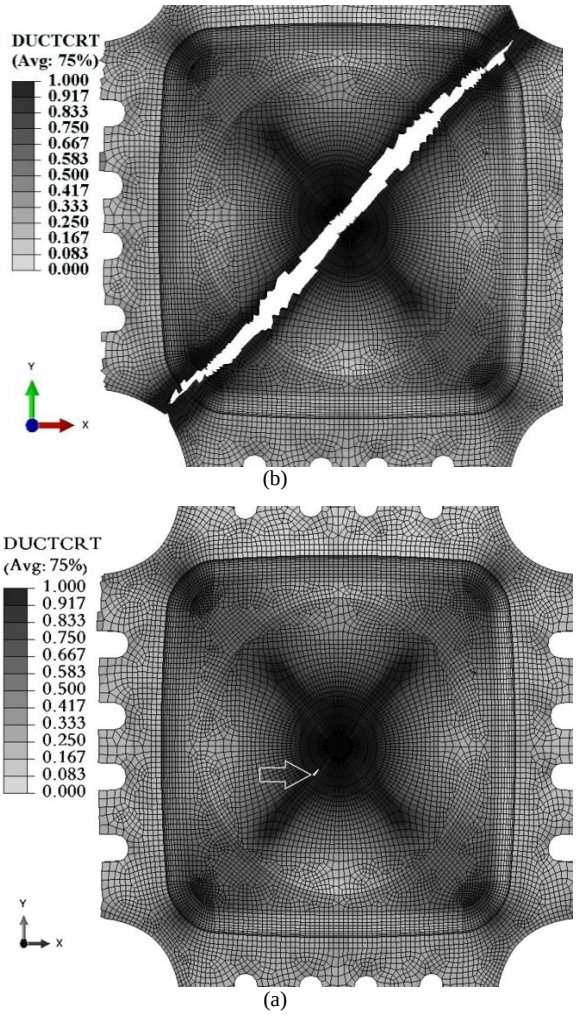


Fig. 13 The Image of cruciform specimen fracture process by FEM quasi-static analysis and the white-black contour of dimensionless parameter of ductile damage criterion for Al. alloy 5083 compared to Fig. 9

شکل 13 تصویر روند شکست نمونهٔ صلیبی از آلیاژ آلومینیوم 5083 با استفاده از حل شبه-استاتیک اجزای محدود، به‌وسیلهٔ توزیع سیاه-سفید پارامتر بدون بعد معیار آسیب نرم، در مقایسه با شکل 9

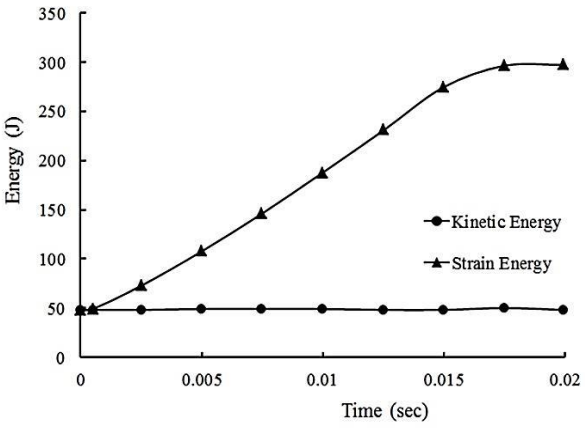


Fig. 14 the kinematic and strain energy curves that obtained from FEM quasi-static analysis

شکل 14 نمودارهای انرژی جنبشی و انرژی کرنشی بدست آمده از تحلیل شبه-استاتیکی اجزای محدود

یکی از نتیجه‌های جالب توجه برای مقایسه، در یافته‌های پژوهش، تعیین موقعیت بروز آسیب در مقطع آزمون نمونه است. از "شکل a-9" موقعیت بروز آسیب روی راستای 224.88 درجه (مثلثاتی) نسبت به راستای نورد و در شعاع 8.2 میلی‌متر است. از "شکل a-13" این موقعیت به مقدار 228.2 درجه و 3.2 میلی‌متر است. این نتایج بسیار نزدیک به هم و مطلوب هستند.

نمودار انرژی جنبشی[1] و نیز نمودار انرژی کرنش کل[2] که در حل شبه‌استاتیکی از تحلیل اجزای محدود به‌دست آمده‌اند به‌صوت "شکل 14" هستند. در یک تحلیل شبه-استاتیکی مقدار انرژی جنبشی نباید از کسر کوچکی از انرژی کرنشی بیشتر باشد. نمودار "شکل 14" این موضوع برآورده شده است.

یک نتیجهٔ بسیار کاربردی از تحلیل‌های اجزای محدود، استخراج مقادیر تنش در محل بروز آسیب، در دو راستای نورد و عرضی ورق است. این آگاهی وجود دارد که اندازه‌گیری به‌نسبت دقیق تنش، در نقطه‌ای از قطعه تحت بار که دچار آسیب شده در حال حاضر بسیار دشوار و شاید غیر ممکن باشد. تعیین تنش در چنین حالت‌هایی از طریق اندازه‌گیری‌های تغییرشکل و یا کرنش و سپس محاسبات تنش انجام می‌شود. مقادیر تنش در یک لحظه قبل از بروز آسیب در راستاهای نورد و عرضی به‌ترتیب $S_{11} = 407$ و $S_{22} = 485$ مگاپاسکال به‌دست می‌آیند. مقدارهای تنش به‌دست آمده در حالت بارگذاری دومحورهٔ مساوی به‌صورت جابه‌جایی، نشان می‌دهند که شرایط بارگذاری برای به‌دست آوردن تنش دومحوره-مساوی با بارگذاری دومحوره-مساوی بسیار متفاوت است. یعنی هیچ الزامی برای به‌دست آوردن تنش‌های دومحوره-مساوی با ایجاد بارهای مساوی به‌صورت جابه‌جایی در دو بازوی نمونهٔ صلیبی وجود ندارد. پی‌آمد دیگری که می‌توان به‌دنبال آن بود، تمرکز و یا پراکندگی نقاط تنش دومحوره نسبت به نقطهٔ تنش دومحورهٔ مساوی در حالت بارگذاری بانسبت بارهای مختلف، به‌ویژه به‌صورت هم‌زمان در صفحه تنش، است.

با تکرار تحلیل‌های انجام شده در این مقاله برای نسبت بارهای مختلف می‌توان مکان هندسی شکست ماده را به‌دست آورد. این مکان هندسی همان نمودار تنش حد شکل‌دهی بوده که به‌عنوان یک معیار شکست برای طراحان بسیار مفید و کاربردی است. هم‌چنین با استفاده از نمودار تنش حد شکل‌دهی می‌توان صحت بسیاری از معیارهای رفتار شکست مواد مختلف را بررسی نموده و یا معیار جدیدی برای مواد ارائه داد. البته محدودیت‌های حاکم بر نمونه‌های صلیبی شکست از نظر به‌دست آوردن نقاط دومحوره غیر از نقاط بارگذاری دومحورهٔ مساوی و نیز شرایط سخت‌شوندگی و یا نرم‌شوندگی ماده بسیار اهمیت دارد که می‌توان در مراحل بعدی پژوهش به آن‌ها پرداخت.

7- نتیجه‌گیری

هدف کلی در این مقاله بررسی کیفی و کمی شکست آلیاژ آلومینیوم 5083، به‌وسیلهٔ نمونهٔ صلیبی، تحت بارهای دو محورهٔ مساوی، به‌روش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود است. در این راستا آزمون های تک محوره در جهات مختلف ورق، برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی ماده انجام شده‌اند. برای انجام آزمون‌های دو محوره از نمونهٔ صلیبی لیونل، که اساساً برای رفتار شکست فلزهای شکل‌پذیر طراحی شده، استفاده شده است. یک سازوارهٔ کشش دومحورهٔ وابسته، متناسب با دستگاه آزمون کشش-فشار تک‌محورهٔ

[1] Kinematic energy (ALLKE)
[2] Total strain energy (ALLIE)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]

اینسترون-1343، طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این سازواره، آزمون‌های تجربی دومحوره انجام شدند. تجهیزات اندازه‌گیری مانند میکروسکوپ دینولایت، نیروسنج‌های الکتریکی، ترموکوپل لیزری و غیره با دقت به نسبت مناسب و با انجام تنظیمات اولیه به‌کار برده شده‌اند.

نمودارهای بارگذاری اندازه‌گیری شده از نیروسنج‌های الکتریکی سازوارهٔ کشش دومحورهٔ وابسته، همبستگی خوبی با نمودار اندازه‌گیری شده از نیروسنج دستگاه آزمون کشش-فشار تک‌محوره اینسترون-1343 نشان می‌دهد. این همبستگی در شکل و حالت نمودارها و نیز مقدار بیشینهٔ آن‌ها مشهود است. از سوی دیگر نمودارهای نیرو-جابه‌جایی بازوهای نمونهٔ صلیبی، که از روش اجزای محدود استخراج شده‌اند، همبستگی خوبی با نمودارهای تجربی به‌دست آمده، دارند.

از کمیت‌های مقایسه‌ای نتایج تجربی و عددی، موقعیت آغاز شکست و مسیر توسعه آن هستند که در این خصوص همبستگی خوبی بین نتایج تجربی و عددی ملاحظه شود. همچنین چروکیدگی نواحی گوشه روی نمونه و جابه‌جایی مرکز نمونه در راستای ضخامت نمونه قبل از شکست نسبت به محورهای بارگذاری، به‌دلیل عدم وجود تقارن برای نمونه نسبت به صفحه عمود بر راستای ضخامت از مواردی هستند که در عمل و در تحلیل‌های عددی مشاهده شد.

به‌طور کلی مقایسهٔ نتایج تجربی و عددی در این پژوهش نشان می‌دهد که روش تحلیل عددی به‌کار برده شده می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار شکست مواد فلزی شکل‌پذیر به‌کار برده شود و قابل اعتماد است.

اندازه‌گیری تنش در تغییرشکل‌های بزرگ، در محل شکست ماده، چالش بسیار بزرگی است که معمولاً از طریق محاسبه این کار انجام می‌گیرد. برای بررسی و یا بیان مدل ریاضی رفتار یک مادهٔ خاص و یا طیفی از مواد نیاز به مکان هندسی تسلیم/شکست می‌باشد. کار حاضر این توانمندی را ایجاد می‌نماید تا مبتنی بر تجربه و با استفاده از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود بتوان مکان هندسی به‌نسبت دقیقی برای ماده، در ربع اول صفحه تنش، رسم نمود. از این‌رو در ادامه این پژوهش با تکرار تحلیل‌های عددی اجزای محدود برای نسبت بارهای مختلف در بازوهای نمونهٔ صلیبی و در نرخ‌های کرنش و دماهای مختلف می‌توان رفتار کشش دومحوره ماده را بررسی نمود.

8- سپاس‌گزاری

نگارندگان لازم می‌دانند از مدیریت مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری زیردریا، جهت تأمین اعتبار و ایجاد تسهیلات لازم در پیشبرد اهداف این پژوهش صمیمانه سپاس‌گزاری نمایند. هم‌چنین از مدیریت و کارشناسان محترم آزمایشگاه‌های مرکزی صنایع هواپیماسازی ایران، هسا، جهت همکاری در آزمون‌های تجربی و آزمایشگاهی سپاس‌گزاری می‌شود. کلیهٔ حقوق مادی و معنوی این تحقیق متعلق به دانشگاه صنعتی مالک اشتر است.

9- مراجع

[1] D. Banabic, T. Balan, D. Comsa, A new yield criterion for orthotropic sheet metals under plane-stress conditions, *Proceedings of the 7th Conference 'TPR2000'*, Cluj Napoca, Romania, pp. 217-224, 2000.
[2] A. Hannon, P. Tiernan, A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, No. 1, pp. 1-13, 2008.
[3] D. Li, A. K. Ghosh, Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, No. 3, pp. 281-293, 2004.
[4] M. Schödel, U. Zerbst, C. Dalle Donne, Application of the European flaw assessment procedure SINTAP to thin wall structures subjected to biaxial and mixed mode loadings, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, No. 5, pp. 626-642, 2006.
[5] G. Quaak, Biaxial testing of sheet metal: An experimental-numerical analysis, *Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Computational and Experimental Mechanics*, pp. 1-33, 2008.
[6] G. Gutscher, H. C. Wu, G. Ngaile, T. Altan, Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 1-7, 2004.
[7] L. Leotoing, D. Guines, I. Zidane, E. Ragneau, Cruciform shape benefits for experimental and numerical evaluation of sheet metal formability, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 6, pp. 856-863, 2013.
[8] J. Boehler, S. Demmerle, S. Koss, A new direct biaxial testing machine for anisotropic materials, *Experimental Mechanics*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-9, 1994.
[9] M. H. Yu, Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 55, No. 3, pp. 169-218, 2002.
[10] Y. Yu, M. Wan, X. D. Wu, X. B. Zhou, Design of a cruciform biaxial tensile specimen for limit strain analysis by FEM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, No. 1, pp. 67-70, 2002.
[11] F. K. Abu-Farha, *Integrated Approach to the Superplastic Forming of Magnesium Alloys*, PhD Thesis, University of Kentucky, 2007.
[12] T. Kuwabara, S. Ikeda, K. Kuroda, Measurement and analysis of differential work hardening in cold-rolled steel sheet under biaxial tension, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80, pp. 517-523, 1998.
[13] M. Brieu, J. Diani, N. Bhatnagar, A new biaxial tension test fixture for uniaxial testing machine—a validation for hyperelastic behavior of rubber-like materials, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 35, No. 4, pp. 364-372, 2006.
[14] S. Z. Vezer, Z. Major, Development of an in-plane biaxial test setup for monotonic and cyclic tests of elastomers, *Polymer Competence Center Leobben, Proceeding of 25th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, Budweis, CZ, 2004.
[15] N. Deng, T. Kuwabara, Y. Korkolis, Cruciform specimen design and verification for constitutive identification of anisotropic sheets, *Experimental Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 1005-1022, 2015.
[16] L. Leotoing, D. Guines, Investigations of the effect of strain path changes on forming limit curves using an in-plane biaxial tensile test, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 99, pp. 21-28, 2015.
[17] J. Robinson, Serrated flow in aluminium base alloys, *International Materials Reviews*, Vol. 39, No. 6, pp. 217-227, 1994.
[18] A. Yilmaz, The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 12, No. 6, pp. 063001, 2011.
[19] M. Janbakhsh, M. Riahi, F. Djavanroodi, Anisotropy induced biaxial stress-strain relationships in aluminum alloys, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 1, 2012.
[20] F. Djavanroodi, M. Janbakhsh, Formability characterization of titanium alloy sheets, *Titanium Alloys-Advances in Properties Control*: InTech, 2013.
[21] A. S. Khan, H. Liu, Strain rate and temperature dependent fracture criteria for isotropic and anisotropic metals, *International Journal of Plasticity*, Vol. 37, pp. 1-15, 2012.
[22] A. S. Khan, S. Yu, Deformation induced anisotropic responses of Ti–6Al–4V alloy. Part I: Experiments, *International Journal of Plasticity*, Vol. 38, pp. 1-13, 2012.
[23] A. S. Khan, S. Yu, H. Liu, Deformation induced anisotropic responses of Ti–6Al–4V alloy Part II: A strain rate and temperature dependent anisotropic yield criterion, *International Journal of Plasticity*, Vol. 38, pp. 14-26, 2012.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.34.6]