



تحلیل اثر فرایند پرسکاری داغ بر خواص مکانیکی ورق آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

علیرضا جلیل^۱، نصرالله بنی مصطفی عرب^{۲*}، مالک نادری^۳، یعقوب دادگر اصل^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: n.arab@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۶ آبان ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۱ آذر ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

آلومینیوم ۷۰۷۵

پرسکاری داغ

عملیات حرارتی

خواص مکانیکی

اجزای محدود

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به ضربه خوب، یکی از مواد پر کاربرد در صنایع هوافضا و خودروسازی است. با این وجود، برخی از محدودیت‌های این آلیاژ، قابلیت شکل دهی ضعیف، برگشت فنری زیاد در دماهای پایین و همچنین اعوجاج حرارتی در شکل دهی داغ است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، از یک فرایند ترمومکانیکی که شامل عملیات حرارتی محلولی، شکل‌دهی و سرد نمودن سریع در قالب می‌باشد می‌توان استفاده نمود. در این تحقیق، برای تولید قطعه ای U شکل به عمق ۳۰ میلی‌متر، ابتدا ورق ۷۰۷۵ با ضخامت ۲ میلی‌متر تحت عملیات حرارتی محلولی در دمای ۴۸۰°C قرار داده شد و سپس بلافاصله در قالبی سرد در دمای ۴°C با مدت زمان نگهداری ۲۰ ثانیه شکل داده شد. در نهایت، بمنظور بهبود خواص مکانیکی قطعه، عملیات پیرسختی بر روی آن انجام شد. شبیه‌سازی فرایند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نیز انجام شد. کیفیت ابعادی مناسب قطعه U شکل، عدم وجود پارگی درقطعه نهایی، تطابق بسیار نزدیک بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی، کاهش قابل قبول ۲۵ درصدی ازدیاد طول، استحکام کششی بسیار نزدیک به فلز پایه و ریزسختی معادل ۹۵ درصد فلز پایه از نتایج این تحقیق است.

Analysis of the effect of the hot stamping process on mechanical properties of 7075 aluminum alloy sheet

Alireza Jalil¹, Nasrollah Bani Mostafa Arab^{2*}, Malek Naderi³, Yaghoub Dadgar Asl⁴

1- PhD Student, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

3- Professor, Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: n.arab@sru.ac.ir

Article Information

Abstract

Original Research Paper

Received: 7 November 2023

Accepted: 12 December 2023

Keywords:

Aluminum 7075

Hot Stamping

Heat Treatment

Mechanical Properties

Finite Element

7075 aluminum alloy, with a high strength-to-weight ratio and good impact strength, is one of the useful materials in the aerospace and automotive industries. However, this alloy has limitations such as poor formability, high spring back at low temperatures, and thermal distortion during hot forming. To overcome these limitations, a thermomechanical process including solution heat treatment, forming, and quenching in the die can be used. In this research, for producing a U-shape part with a depth of 30 mm, a 7075 sheet with a thickness of 2 mm was first subjected to solution heat treatment at a temperature of 480 °C, and then was immediately transferred to a cooling die to be formed at a temperature of 4 °C under a hold time of 20 seconds. Finally, the part was artificially aged to improve its mechanical properties. A finite element simulation of the process using the ABAQUS software was also performed. Good dimensional accuracy and absence of rupture in the final U part, close agreement between the experimental and simulation results, an acceptable 25% reduction in elongation, very close tensile strength to the base material, and microhardness equal to 95% of the base material are the results of this research.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Jalil A, Bani Mostafa Arab N, Naderi M, Dadgar Asl Y. Analysis of the effect of the hot stamping process on mechanical properties of 7075 aluminum alloy sheet. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 July 23;10(5):68-78. doi: 10.22034/IJME.2023.424240.1872 [In Persian]

۱- مقدمه

بهره‌وری سوخت به دلایل اقتصادی و زیست محیطی یک چالش مهندسی حیاتی برای سازندگان در سطح جهانی بوده است. این امر باعث شده است تا تولیدکنندگان قطعات راه های مقرون به صرفه ای برای کاهش وزن با ترکیب مواد مناسب و فناوری های کم هزینه پیدا کنند [۱]. آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، شکل پذیری نسبتا خوب در درجه حرارت بالا، قابلیت جوشکاری، بازیافت پذیری و مقاومت بالا در برابر خوردگی، ماده سبک وزن ایده آلی است [۲]. آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا، بطور فزاینده ای در صنایع هوافضا، نظامی، دریایی و خودروسازی مورد توجه قرار گرفته اند [۳، ۴]. از این رو، تولیدکنندگان جهانی اصلی قطعات خودرو نظیر آودی^۱، جگوار^۲ و لندروور^۳ به استفاده از آلیاژهای آلومینیوم روی آورده اند. با نگاه به رعایت استانداردهای جدید ایمنی، بهبود بازدهی سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و در عین حال بهبود عملکرد بدنه خودرو، آلیاژهای آلومینیوم سری ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ و اخیرا سری ۷۰۰۰ در بدنه و پوسته چندین خودروی تجاری مورد استفاده قرار گرفته اند [۵، ۶]. آلیاژ کارپذیر آلومینیوم ۷۰۷۵ نیز بخاطر استحکام ویژه بالا و ظرفیت جذب انرژی مناسب با فولادهای استحکام فوق پیشرفته^۴ DP و^۵ TRIP مقایسه می شود [۷].

عیب اصلی آلیاژهای آلومینیوم، شکل پذیری ضعیف در دمای اتاق و برگشت فنری است. برای غلبه بر مشکلات ذاتی تکنیک های شکل دهی سرد، فناوری جدیدی برای شکل دهی در دماهای بالا به نام پرسکاری داغ یا ضرب زنی داغ^۶ توسعه پیدا کرده است که در ابتدا برای فولادهای استحکام بالای برن دار در قطعات ایمنی خودرو بکار گرفته شد. پرسکاری داغ یک فناوری در حال توسعه است که در طیف گسترده ای از فولادهای زنگ نزن دوفازی و نسل سوم فولادهای پیشرفته با استحکام بالا^۷ و جدیدترین نسل فولادهای منگنزدار متوسط با مقاومت بالا و شکل پذیر قابلیت کاربرد پیدا کرده است. این رویکرد نه تنها می تواند مشکل شکل پذیری ضعیف، برگشت فنری، اعوجاج و عدم دقت در تولید قطعات فولادی استحکام بالا را حل کند، بلکه به طور چشمگیری خواص مکانیکی قطعات را نیز بهبود می بخشد. با این فرایند امکان تولید قطعات با استحکام کششی در محدوده ۱۵۰۰-۲۰۰۰ مگاپاسکال و نیز سفتی^۸ متنوع فراهم شده است [۸]. این فناوری برای تولید قطعات آلیاژ آلومینیوم با استحکام بالا تحت نام HFQ^۹ توسعه یافته است که ترکیبی از عملیات حرارتی، شکل دهی و سریع سرد کردن در یک مرحله است. در سال های اخیر فناوری HFQ در صنایع خودروسازی بعنوان یک فن آوری برتر در شکل دهی آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا مانند آلیاژ ۷۰۷۵ رویکرد امیدوارکننده ای از خود نشان داده است [۹]. در این فرایند بعد از عملیات حرارتی محلولی قطعه خام، عملیات شکل دادن و سرد کردن آن در یک مرحله منجر به بهبود قابل توجهی در شکل پذیری، دقت ابعادی بالا و کاهش قابل توجه برگشت فنری خواهد شد [۱۰].

محمد و همکاران [۹] ویژگی های تغییر شکل و شکست آلیاژ ۶۰۸۲ را در فرایند پرسکاری داغ بررسی کردند. آن ها با کالیبره کردن مجموعه ای از معادلات سازنده آسیب ویسکوپلاستیک مرتبط با آلیاژ، مدل شبیه سازی آن را در نرم افزار آباکوس اجرا کردند. نتایج شبیه سازی آن ها با آزمایش تجربی تایید و تطابق نزدیکی بین پیش بینی ها و مشاهدات تجربی حاصل شد. ونچاوو و همکاران [۱۱] شکل پذیری ورق ۷۰۷۵ را در فرایند پرسکاری داغ بطور عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که قابلیت شکل پذیری با افزایش سرعت شکل دادن و کاهش دمای شکل دهی، بهبود پیدا می کند. علاوه بر این، اصطکاک اثر زیادی روی تعیین موقعیت شکست داشت. همچنین مدل اجزای محدود^{۱۰} با نرم افزار آباکوس، نتایج تجربی مربوطه را مورد تایید قرار داد. کمار و همکاران [۱۲] شکل پذیری و خواص مکانیکی آلیاژ استحکام بالا AW-7921 را در فرایند پرسکاری داغ مطالعه کردند. آن ها دریافتند که با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، استحکام تسلیم و استحکام کشش نهایی کاهش می یابد، در حالیکه حساسیت نرخ کرنش و ازدیاد طول در هنگام شکست افزایش می یابد. مندیگیورن و همکاران [۱۳] شکل پذیری قطعه ای از خودرو (عضو کناری جلو درب خودرو سواری فولکس واگن^{۱۱}) از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را در فرایند پرسکاری داغ بررسی کردند. آن ها نشان دادند که در این فرایند و فرایند

¹ Audi

² Jaguar

³ Land Rover

⁴ Dual Phase

⁵ Transformation Induced Plasticity

⁶ Hot Stamping

⁷ Advanced High-Strength Steels

⁸ Stiffness

⁹ Hot Forming in-die Quenching

¹⁰ Finite Element Model (FEM)

¹¹ Volkswagen Touran

تمپر کردن در آب، استحکام قطعات آلومینیوم ۷۰۷۵ حتی بعد از افت خواص مکانیکی در مقایسه با آلیاژهای معروف سری ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ تقریباً دو برابر به دست می‌آید و هر دو فرایند قادر به شکل دهی قطعه بدون شکست بودند. وانگ هیو و همکاران [۱۴] رفتار شکل پذیری آلیاژ ۷۰۷۵ را در دماهای بالا بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد کشش عمیق و شکل پذیری کششی در دماهای زیر 140°C ضعیف است، درحالیکه شکل دهی در دمای بالاتر از 140°C افزایش زیادی خواهد داشت. بهترین شکل پذیری کشش عمیق نزدیک دمای 180°C و بهترین شکل‌پذیری کششی نزدیک دمای 220°C بوده است. همچنین در دماهای بالای 260°C ، شکل‌پذیری و خواص مکانیکی بعد از شکل دهی به علت اثر فرایندهای حرارت دهی و شکل دهی در تمپر کردن شروع به کاهش می‌کند. رایت و همکاران [۱۵] امکان انجام پرسکاری داغ قسمت بیرونی ستون^۱ B از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با استفاده از قالبی از جنس کرسایت^۲ را ارائه کردند. قطعات مورد نظر بعد از عملیات شکل‌دهی و سریع سرد کردن، برای کسب خواص تمپر T6 پیرسختی مصنوعی^۳ شدند. نتایج نشان داد قطعه ستون B با استحکام بالا و با خواصی معادل تمپر T6 ورق اولیه و دقت ابعادی بالا قابل تولید است. هریسون و همکاران [۷] همچنین تولید قسمت بیرونی ستون B با استفاده از پرسکاری داغ و به دنبال آن پیرسختی مصنوعی آلیاژ ۷۰۷۵ را گزارش کردند. نتایج نشان داد که قطعه نهائی تقریباً خواص مشابهی با آلیاژ اولیه T6 با برگشت فوری محدود و دقت ابعادی بالا دارد. بررسی تحقیقات گزارش شده در مورد فناوری پرسکاری داغ آلیاژ ۷۰۷۵، اهمیت شناخت بیشتر رفتار و خواص مکانیکی این آلیاژ برای استفاده در صنعت را نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر، تحلیل دقیق‌تر فرایند HFQ برای ورق 7075-T6 انجام شد. ابتدا ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر تحت عملیات حرارتی قرار گرفت و بلافاصله در قالب سرد کننده به قطعه U شکل تبدیل شد. در نهایت عملیات پیرسختی روی قطعه در دمای 120°C و در مدت زمان ۲۴ ساعت انجام شد. به منظور مطالعه خواص مکانیکی، آزمایش‌های کشش و میکروسختی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج مربوط به خواص مکانیکی قطعات تولید شده با ورق اولیه مقایسه شد. همچنین پیش‌بینی شکل‌پذیری و احتمال پارگی قطعه در دمای بالا در شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس انجام شد.

۲- روش تجربی

۲-۱- آماده سازی ماده

در این تحقیق از ورق آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 به ابعاد 250×140 میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است که در این مقاله ورق اولیه^۴ نامیده می‌شود. جزئیات عناصر تشکیل دهنده و خواص مکانیکی این آلیاژ در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. آزمایش کشش تک محوره طبق استاندارد ASTM-E8 در جهت نورد بر روی نمونه‌های ماده اولیه مطابق شکل ۱ انجام شد. آزمایش میکروسختی ویکرز (HV) نیز بر اساس استاندارد ASTM E384-16:2018 بر روی ماده پایه با اعمال بار ۳۰۰ gf و در مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فلز پایه 7075-T6

Material	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Ti	Mn	Zr	Al
7075-T6	5.84	2.1	1.41	0.18	0.15	0.06	0.037	0.02	0.01	Bal

جدول ۲ خواص مکانیکی ماده اولیه 7075-T6

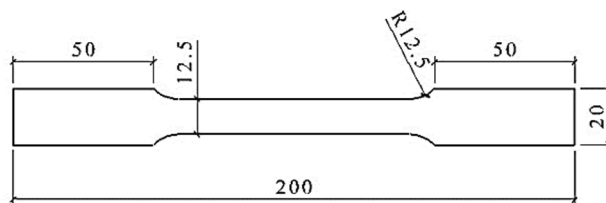
ماده	ازدیاد طول (%)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهائی (MPa)	تنش شکست (MPa)	سختی (HV)
7075-T6	۱۲	۴۹۵	۵۶۸	۵۴۲	۱۸۴

¹ B-Pillar

² Kirksite

³ Artificial Aging

⁴ Blank



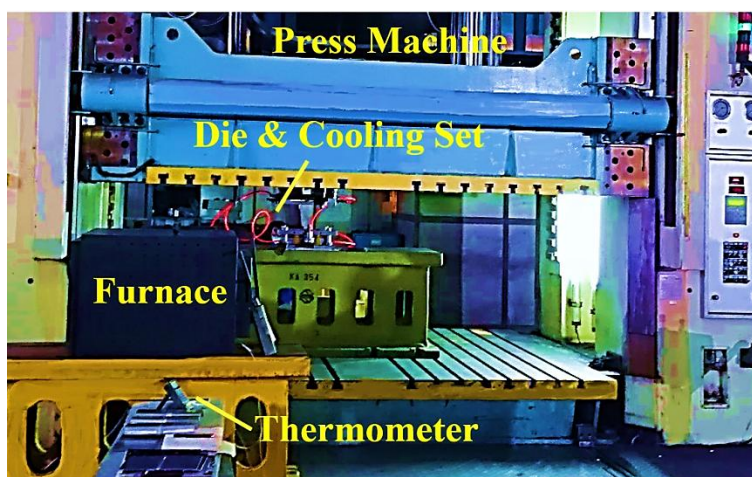
شکل ۱ شکل و ابعاد نمونه آزمایش کشش (میلیمتر)

۲-۲- عملیات حرارتی محلولی^۱

اولین مرحله برای انجام فرآیند HFQ عملیات حرارتی محلولی است. در این مرحله از یک دستگاه کوره الکتریکی مجهز به ترموستات و ترموکوپل نوع K با قابلیت دمائی 1200°C استفاده شد که برای این کار در دمای 500°C کنترل شده است. ورق اولیه ابتدا چربی زدائی و تمیزکاری شد و سپس به مدت ۸ دقیقه در داخل محفظه کوره در معرض دمای کوره قرار گرفت. پس از اینکه ورق به دما و زمان محلول سازی رسید درب کوره باز شد و قطعات در حداقل زمان (۷ تا ۹ ثانیه) به دستگاه پرس هیدرولیکی انتقال داده شد.

۳-۲- عملیات فرمینگ-کوئنچینگ در قالب^۲

در این آزمایش از یک دستگاه پرس هیدرولیک 50KN با کنترل سرعت قابل تنظیم استفاده شد. برای شکل دادن قطعه به هندسه U شکل، مجموعه ای از قالب های بالا و پایین و یک ورق گیر^۳ از جنس فولاد ابزار گرم کار H13 طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. توسط یک دستگاه پرس هیدرولیک با سرعت آهسته 40mm/s قالب بالایی با سطح ورق تماس پیدا کرد. عملیات شکل دهی و سردکردن ورق در داخل مجموعه قالب انجام شد. مجموعه قالب و کوره عملیات حرارتی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در این مجموعه قالب، برای سرد شدن پیوسته ورق در حین شکل دهی و بعد از آن، در قالب بالائی و پائینی و ورق گیر، تعدادی کانال خنک کاری با آب سرد به قطر 10 میلیمتر طراحی و تعبیه شد (شکل ۲). بعد از پائین آمدن قالب بالائی و کامل شدن عمق قطعه به اندازه 30 میلیمتر، قطعه در نقطه مرگ پائین قالب به مدت 20 ثانیه تحت بار نگه داشته شد تا در شرایط کوئنچینگ قالب سرد، هندسه سه بعدی U شکل تکمیل و در نتیجه برگشت فنری و اعوجاج قطعه به حداقل ممکن برسد. در انتها با حرکت سریع قسمت بالایی قالب، قطعه U شکل پرسکاری شده داغ از دستگاه پرس جدا شد (شکل ۳).



شکل ۲ مجموعه قالب و کوره عملیات حرارتی

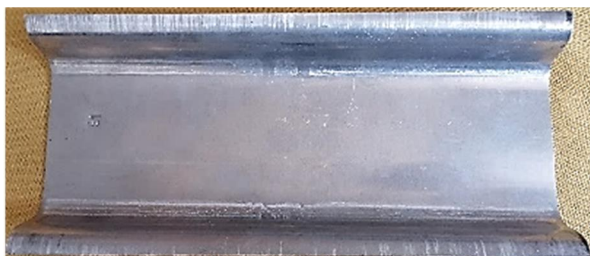
¹ Solution Heat Treatment (SHT)

² Forming-in die Quenching

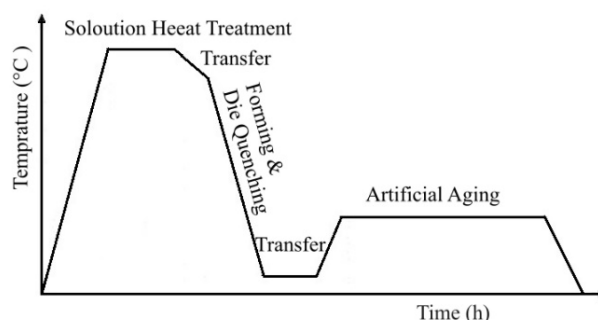
³ Blank Holder

۲-۴- عملیات پیرسختی مصنوعی

پس از عملیات شکل‌دهی و کوئنچینگ، پیرسختی مصنوعی آخرین عملیاتی است که برای بازیابی و بهبود خواص مکانیکی قطعه تولید شده انجام گرفت. در عملیات پیرسازی، قطعه به مدت ۲۴ ساعت در کوره عملیات حرارتی در دمای 120°C قرار گرفت و سپس از کوره خارج شد. شکل ۳ قطعه نهایی پرسکاری داغ-پیرسختی شده را نشان می‌دهد. شماتیکی از مراحل عملیات طراحی شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳ قطعه پرسکاری داغ-پیرسختی شده



شکل ۴ شماتیک فرایند پرسکاری داغ و پیرسختی مصنوعی

۳- مدل سازی اجزای محدود پرسکاری داغ

مدل سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی داغ قطعه U شکل در قالب فرمینگ-کوئنچینگ با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد. شکل ۵ تصویر مدل شبیه‌سازی ورق و قالب‌ها را در این فرایند نشان می‌دهد. به دلیل وجود تقارن، برای کاهش زمان تحلیل، در این فرایند نیمی از ورق شبیه‌سازی شده است. با توجه به تفاوت استحکام بین قالب سرد و ورق داغ، ابزارها شامل سنبه، قالب و ورق‌گیر، بدنه‌های قابل تغییر شکل^۱ با مدول الاستیک بالا در نظر گرفته شدند. برای اعمال حرارت در حین شکل‌دهی از کوپل مکانیکی-حرارتی استفاده شده است. ورق اولیه با استفاده از المان‌های پوسته نازک^۲ چهارگره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته^۳ در جهت ضخامت مش بندی شد. برای توصیف تغییر شکل ماده (ورق) از مدل الاستوپلاستیک جانسون-کوک استفاده شد. مدل جانسون-کوک شامل پارامترهایی مانند «سخت‌شوندگی کرنش^۴، سخت‌شوندگی سرعت کرنش^۵، و نرم‌شدن حرارتی^۶» است. این مدل تنش جریان را تابعی از کرنش پلاستیک مؤثر، نرخ کرنش مؤثر پلاستیک و دمای ماده ارائه می‌کند. برای اعمال خواص حرارتی-مکانیکی ماده و ضرائب مدل جانسون-کوک آلیاژ ۷۰۷۵ در شبیه‌سازی از جدول ۳ استفاده شده است [۱۶]. ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق ۰/۲ و بین قالب و ورق‌گیر ۰/۱ در نظر گرفته شد [۱۷]. سرعت سنبه روی ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد و دمای ورق اولیه و ابزار به ترتیب ۴۵۰ و ۴ درجه سانتیگراد تنظیم شد.

¹ Deformable Bodies

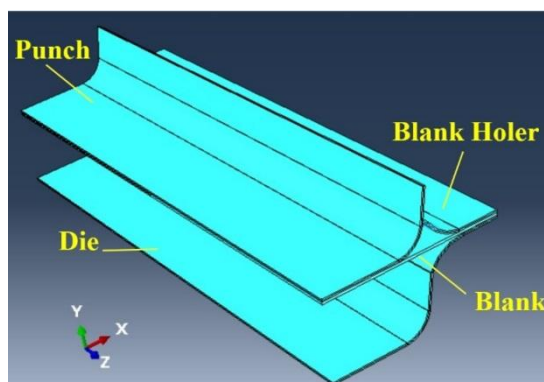
² Thin Shell Elements

³ S4RT

⁴ Strain Hardening

⁵ Strain Rate Hardening

⁶ Thermal Softening



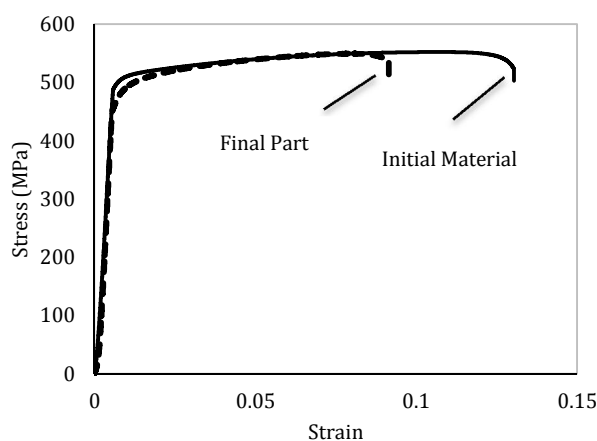
شکل ۵ مدل اجزای محدود شکل‌دهی داغ قطعه U شکل در نرم‌افزار آباکوس

جدول ۳ پارامترهای مدل جانسون-کوک و خواص مواد برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ [۱۶]

خواص ماده	پارامترهای مدل جانسون-کوک
۲۷۰۰ (kg/m ³) چگالی	۵۲۰ A (MPa) تنش سیلان اولیه
۷۰ (GPa) مدول الاستیسیته	۴۷۷ B (MPa) ثابت سخت شوندگی
۱۳۰ (W/mK) رسانندگی گرمایی	۰/۰۰۱ C ثابت نرخ کرنش
۸۷۰ (J/kgK) گرمای ویژه	۰/۵۲ N نمای سخت شوندگی
۰/۳ ضریب پواسون	۱ m' نمای نرم شوندگی حرارتی
	۴ Tr (C°) دمای مرجع
	۶۳۵ Tm (C°) دمای ذوب
	۱ (/s) نرخ کرنش مرجع

۴- نتایج و بحث

منحنی تنش-کرنش نمونه‌های ماده اولیه ۷۰۷۵ و قطعه نهائی در شکل ۶ نشان داده شده است. استحکام، سختی و درصد ازدیاد طول ماده اولیه و قطعه نهائی در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بعد از عملیات حرارتی و شکل‌دهی داغ و متعاقباً پیرسختی قطعه، خواص مکانیکی محصول نهائی بازگشت قابل ملاحظه و نزدیکی به ماده اولیه داشته است.

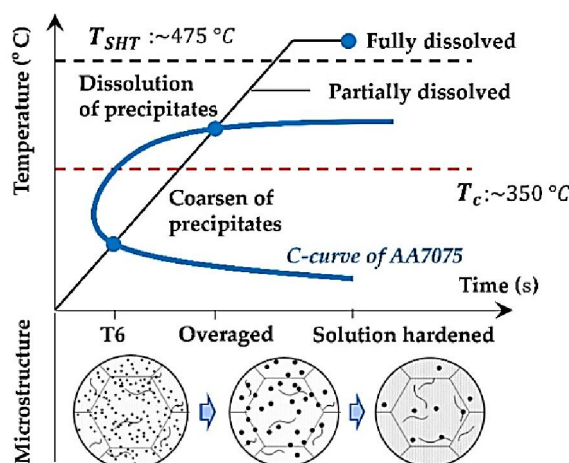


شکل ۶ نمودار تنش - کرنش ماده اولیه و قطعه نهائی 7075-T6

جدول ۳ خواص مکانیکی ورق اولیه ۷۰۷۵ و قطعه نهائی

ازدیاد طول	تنش تسلیم	تنش نهائی	تنش شکست	سختی	
%	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(HV)	
۱۲	۴۹۰	۵۵۲	۵۲۵	۱۸۴	نمونه اولیه
۹	۴۶۵	۵۴۸	۵۳۰	۱۷۵	نمونه نهائی
۷۵	۹۵	۹۹	۱۰۰	۹۵	درصد نمونه نهائی به نمونه اولیه

شکل ۷ شماتیک توالی فرایند رسوب زائی در طول عملیات حرارت دادن با نرخ حرارت دهی خاص برای آلیاژ ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود درشت شدن و همچنین انحلال رسوبات مدل شده است و محدوده دمایی هسته‌زایی و انحلال برای تشکیل رسوبات متغیر است. از این رو خواص این آلیاژ در طول عملیات حرارتی تابع تحولات انحلال و رشد رسوبات خواهد بود. بسیاری از نویسندگان اعتقاد دارند که فاز η' رسوب غالب برای استحکام بخشی است و این فاز در ریزساختار زمانی که دما به اندازه کافی بالا (بین 300°C تا 400°C) باشد شروع به حل شدن می‌کند [۲]. در مطالعه حاضر که دمایی عملیات حرارتی تا 480°C بالا می‌رود انتظار انحلال کامل رسوبات وجود دارد که طبقاً با افت خواص مکانیکی همراه خواهد بود [۱۸] در زمان شکل دهی نیز در دمایی 450°C هرچند تغییر شکل قطعه راحت‌تر انجام می‌شود اما برای کاهش افت خواص مکانیکی ذکر شده، عملیات پیرسختی مصنوعی ضرورت پیدا می‌کند. بنابراین متعاقب شکل دادن قطعه پرسکاری داغ شده، انجام فرایند پیرسختی مصنوعی بهبود قابل توجه خواص مکانیکی را به همراه داشته است (جدول ۳).

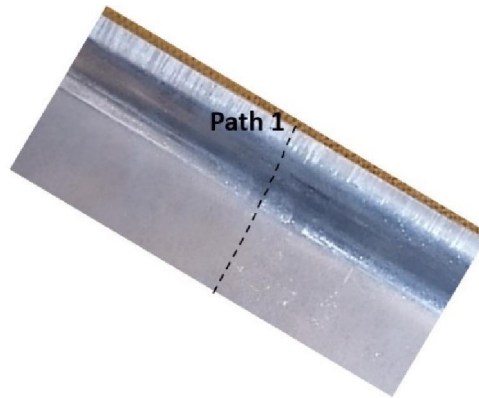


شکل ۷ شماتیک توالی رسوب زائی در طول عملیات حرارتی آلیاژ ۷۰۷۵ [۳]

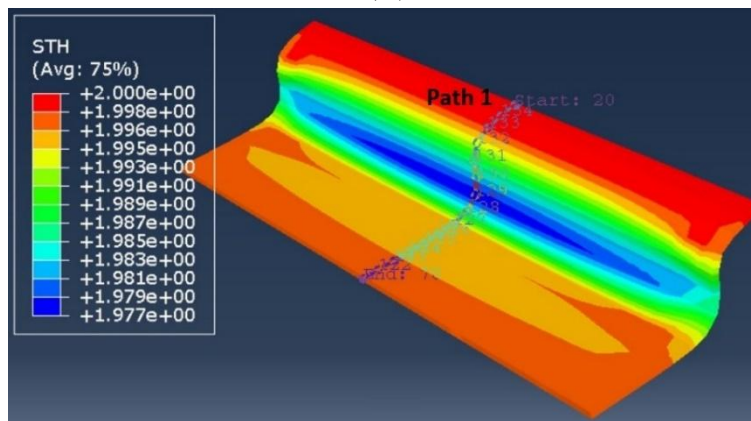
نتایج سختی سنجی نشان داد پس از انجام فرایند پیرسختی در دمایی 120°C و مدت زمان ۲۴ ساعت، ریزسختی در سطح مقطع نمونه قطعه شکل داده شده برابر ۱۷۵ ویکرز می‌باشد که نزدیک به ۹۵ درصد ماده اولیه (۱۸۴ ویکرز) است. به نظر می‌رسد افزایش سطح سختی نمونه نهائی به دلیل مکانیسم‌های سخت شدن رسوبی، استحکام بخشی محلول جامد و پالایش دانه‌ها بدست آمده است. استحکام کششی و شکست قطعه نهائی به ترتیب برابر ۵۴۸ و ۵۳۰ مگاپاسکال و تقریباً معادل استحکام ماده اولیه بوده است. درصد ازدیاد طول^۱ محصول به عدد ۹ یعنی ۷۵ درصد ماده اولیه رسیده است که کاهش قابل قبول ۲۵ درصدی ازدیاد طول را به همراه دارد. بهبود قابل توجه خواص مکانیکی قطعه نهائی بدون وجود عیب و پارگی پس از دو عملیات پرسکاری داغ و پیرسختی مصنوعی به این نکته قابل ملاحظه اشاره دارد که فناوری HFQ قادر به بازیابی خواص مکانیکی مناسب همراه شکل دهی قطعه با هندسه پیچیده است.

¹ Elongation

شکل‌دهی داغ ورق ۷۰۷۵ با ضخامت ۲ میلی‌متر به قطعه U شکل برای پیش‌بینی شکل‌پذیری و احتمال پارگی قطعه در دماهای بالا شبیه‌سازی نیز شده است. شکل ۸ (الف) مسیر ۱^۱ از نیمه متقارن قطعه U شکل را نشان می‌دهد که از لبه فلنج قطعه شروع و انحنای فلنج، دیواره قطعه، انحنای منتهی به کف قطعه و تختی کف قطعه (محل تماس پیشانی سنبه با ورق) را شامل می‌شود. در شکل ۸ (ب) تغییرات ضخامت قطعه U شکل بعد از HFQ در شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس مشاهده می‌شود که در مسیر ۱ نازک‌شدگی^۲ ضخامت قطعه از لبه فلنج به سمت کف قطعه مشخص شده است.



(الف)



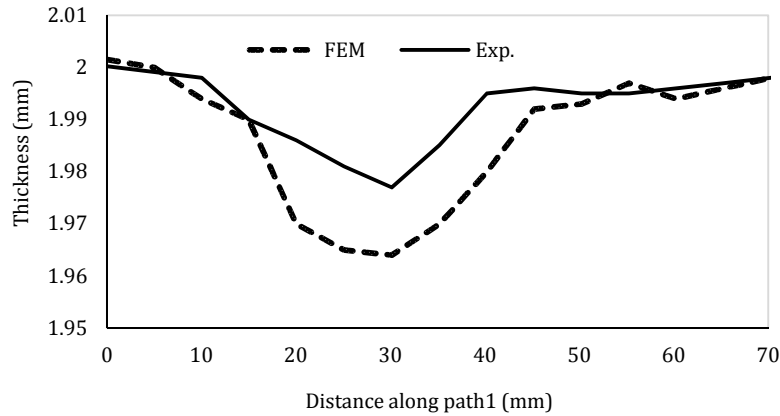
(ب)

شکل ۸ تغییر ضخامت قطعه U شکل بعد از HFQ در (الف) تجربی و (ب) شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس

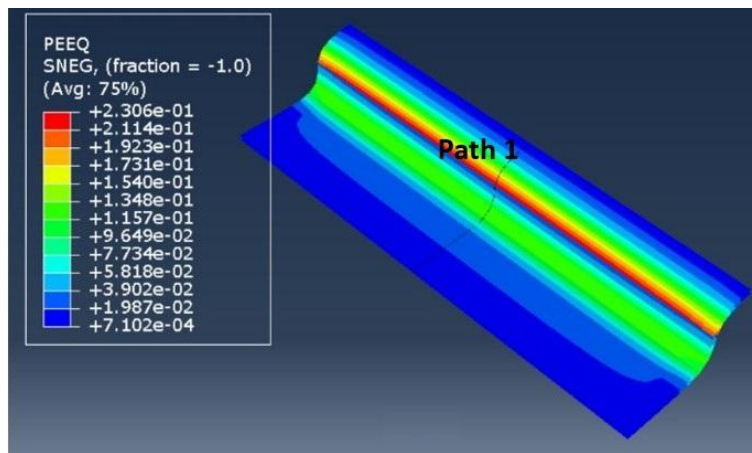
همانطور که در شکل ۹ به‌وضوح دیده می‌شود، در قسمت فلنج و همچنین کف قطعه تغییرات صفر و یا جزئی است. در دو انحنای قطعه حساسیت به نازک شدن بیشتر است. در دیواره منتهی به کف قطعه بیشترین نازک‌شدگی وجود دارد (این ناحیه محل تماس شعاع گوشه سنبه با ورق است) و به سمت مرکز قطعه نیز حداقل مقدار تغییر ضخامت مشاهده می‌شود. با این حال مقادیر نازک‌شدگی تجربی بسیار اندک بوده است. مقایسه تغییرات ضخامت در شبیه‌سازی (۰/۰۳۶ میلی‌متر) و تجربی (۰/۰۲۳ میلی‌متر) اختلاف بسیار نزدیکی را نشان می‌دهد (۰/۰۱۳ میلی‌متر). این مطلب تطابق بسیار نزدیک شبیه‌سازی و تجربی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ شبیه‌سازی کرنش پلاستیک معادل ورق را در امتداد مسیر ۱ از لبه قطعه به سمت مرکز آن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مقادیر کرنش پائین، قطعه U شکل از شکل‌پذیری مناسبی برخوردار بوده است (شکل ۱۰ الف). کرنش پلاستیک معادل روی دو ناحیه شعاعی انحنای قطعه افزایش می‌یابد، بطوریکه در انحنای اول (از سمت فلنج قطعه) و انحنای دوم به ترتیب به ۰/۰۲۳ و ۰/۰۱۲ می‌رسد (شکل ۱۰ ب). کرنش پلاستیک معادل در مرکز قطعه که محل تماس پیشانی سنبه با ورق است نیز حداقل و نزدیک به صفر است. بنابراین، شکل نهایی قطعه می‌تواند با حداقل نازک‌شدگی و بدون هرگونه پارگی و گسیختگی ایجاد شود.

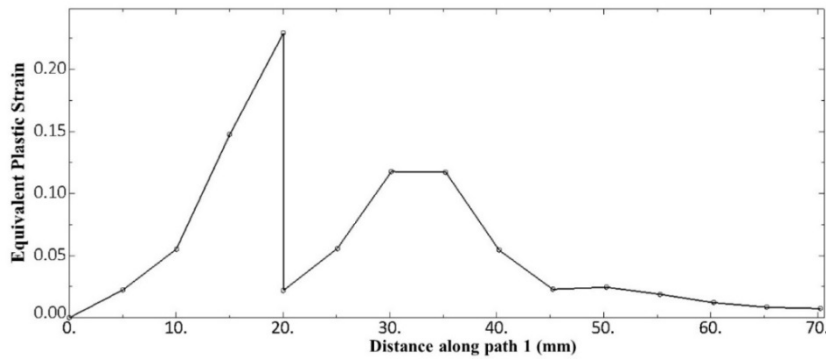
¹ Path1² Thinning



شکل ۹ مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی تغییرات ضخامت نهائی در امتداد مسیر ۱ از لبه تا مرکز قطعه



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ تغییرات کرنش پلاستیک قطعه نهائی در شبیه‌سازی در امتداد مسیر ۱ از لبه تا مرکز قطعه (الف و ب)

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، ورق 7075-T6 به ضخامت ۲ میلی‌متر تحت فناوری ترمومکانیکی جدید HFQ قرار گرفت و اثر فرایند بر خواص مکانیکی قطعه U شکل بررسی شد. نتایج نشان داد که:

- ۱- خواص مکانیکی قطعه ۷۰۷۵ نهائی با هندسه U شکل به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرد و بسیار نزدیک به فلز پایه بود.
- ۲- افت خواص مکانیکی قطعه نهائی نسبت به ورق اولیه در فناوری HFQ، با انجام پیرسختی مصنوعی جبران شد.

- ۳- استحکام کششی و استحکام شکست قطعه نهائی به ترتیب ۵۴۸ و ۵۳۰ مگاپاسکال برابر ۱۰۰ درصد استحکام ماده اولیه گردید.
- ۴- درصد ازدیاد طول قطعه نهائی برابر ۹ معادل ۷۵ درصد ماده اولیه بود که کاهش قابل قبول ۲۵ درصدی ازدیاد طول را به همراه دارد.
- ۵- پیرسختی مصنوعی در دمای 120°C و زمان ۲۴ ساعت باعث دستیابی به ریزسختی (۱۷۵ ویکرز) در قطعه نهائی گردید که ۹۵ درصد ریزسختی ماده اولیه است.
- ۶- در دیواره منتهی به کف قطعه که محل تماس شعاع گوشه سنبه با ورق است حساسیت به نازک شدن بیشتر است. با این حال نازک شدگی در ضخامت قطعه بسیار اندک بوده است (حداکثر $0.23/0$ میلی متر).
- ۷- مدل شبیه سازی شکل دهی داغ قطعه U شکل تطابق بسیار نزدیک با تجربی نشان داد و تولید تجربی قطعه بدون هیچگونه پارگی یا شکست در هندسه نهائی آنرا تایید نمود.
- ۸- ویژگی های قطعه تولید شده نشان دهنده این است که فناوری HFQ قادر به شکل دهی ورق آلایژ ۷۰۷۵ به هندسه پیچیده و بازیابی مناسب خواص مکانیکی است.

References

- [1] Dorward R C, Pritchett T R. Advanced Aluminium Alloys for Aircraft and Aerospace Applications. Materials & Design. 1988 March–April 9(2): pp. 63–69. doi: 10.1016/0261-3069(88)90076-3
- [2] Brown KR, Venie MS, Woods RA. The increasing use of aluminum in automotive applications, The journal of the Minerals, Metals and Materials Society. 1995 47:20-23. doi: 10.1007/BF03221224
- [3] Zheng K, Li Y, Yang S, Fu K, Zheng J, He Z, Yuan S. Investigation and Modeling of the Preheating Effects on Precipitation and Hot Flow Behavior for Forming High Strength AA7075 at Elevated Temperatures. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020 July 4(3): 76. doi: 10.3390/jmmp4030076
- [4] Tohidi Manesh R, Ghobeiti Hasab M, Heidary Moghadam A. Composite fabrication and surface reinforcement of aluminum 7075 by pumice micro and nanoparticles using the friction stir process (FSP). Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020 7(5):56- 63. [In Persian]
- [5] Miller WS, Zhuang L, Bottema J, Wittebrood AJ, De Smet P, Haszler A, Vieregge A. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. Materials Science and Engineering: A. 2000 March 15;280(1):37-49. doi: 10.1016/S0921-5093(99)00653-X
- [6] Mendiguren J, Ortubay R, de Argandoña ES, Galdos L. Experimental characterization of the heat transfer coefficient under different close loop-controlled pressures and die temperatures. Applied Thermal Engineering. 2016 99:813–824. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.133
- [7] Harrison NR, Luckey SG. Hot Stamping of a B-Pillar Outer from High Strength Aluminum Sheet AA7075. SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 2014 7(3):567-573.
- [8] Wróbel I, Skowronek A, Grajcar A. A Review on Hot Stamping of Advanced High-Strength Steels: Technological-Metallurgical Aspects and Numerical Simulation. Symmetry. 2022 14(5): 969. doi: 10.3390/sym14050969
- [9] Mohamed S M, Alistair D F, Jianguo L, Daniel S B, Trevor A D. Investigation of deformation and failure features in hot stamping of AA6082: Experimentation and modelling. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012 53(1):27–38. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.07.005
- [10] Degner J, Horn A, Merklein M. Experimental study on the warm forming and quenching behavior for hot stamping of high-strength aluminum alloys. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 2017 896 012055. doi: 10.1088/1742-6596/896/1/012055
- [11] Xiao W, Wang B, Zheng K. An experimental and numerical investigation on the formability of AA7075 sheet in hot stamping condition. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017 April 21; 92:3299-3309. doi: 10.1007/s00170-017-0419-6
- [12] Kumar M, Ross NG. Investigations on the hot stamping of AW-7921-T4 Alloy Sheet. Advances in Materials Science and Engineering. 2017 Feb 26; 2017:1–10. doi: 10.1155/2017/7679219
- [13] Mendiguren J, Saenz E, Argandoña de, Galdos L. Hot stamping of AA7075 aluminum sheets. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016 159 012026. Mondragon Spain. doi: 10.1088/1757899X/159/1/012026

- [14] Wang H, Luo Y, Friedman P, Chen M, GAO L. Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012 22(1):1-7. doi: [10.1016/S1003-6326\(11\)61131-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61131-X)
- [15] Wright D, Henshaw J, Harrison N, and Luckey S. Stress-Corrosion Cracking Evaluation of Hot Stamped AA7075-T6 B-Pillars. SAE International Journal of Engines. 2017 10(4):2021-2026. doi: [10.4271/2017-01-1271](https://doi.org/10.4271/2017-01-1271)
- [16] Idrees U, Ahmad S, Shah IA, Talha M, Shehzad R, Amjad M, Rahi Amin Kolor SS. Finite element analysis of car frame frontal crash using lightweight materials. 2023 Journal of Engineering Research. 11 (2023) 100007. doi: [10.1016/j.jer.2023.100007](https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100007)
- [17] Ma Z, Ji H, Huang X, Xiao W, Tang X. Research on High Temperature Stamping Forming Performance and Process Parameters Optimization of 7075 Aluminum Alloy. Materials. 2021 14(19), 5485. doi: [10.3390/ma14195485](https://doi.org/10.3390/ma14195485)
- [18] Abdolazizi A, Fallahi A. Effect of ECAP and Heat treatment on Mechanical properties of 7075 Al Alloy. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2016 3(2):1-10. [In Persian]