



A Constitutive Model for Stainless Steel 304 Sheet Considering Size Effect in Micro-Scale

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Karimi Firoozjaei M.¹,
Moslemi Naeini H.^{1*},
Kasaei MM.²,
Mirnia MJ.³

How to cite this article

Karimi Firoozjaei M, Moslemi Naeini H, Kasaei MM, Mirnia MJ, A constitutive model for stainless steel 304 sheet considering size effect in micro-scale. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(08):519-528.

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, I.R. of Iran

² Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

³ Faculty of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, IR Iran.
P.O.Box: 14115-143

moslemi@modares.ac.ir

Article History

Received: February 27, 2022

Accepted: April 04, 2022

ePublished: June 17, 2022

ABSTRACT

The deformation behavior of the material in micro-forming processes is different from macro-scale due to the size effect. The size effect in micro-scale appears due to few grains in the deformation region and causes the material behavior to be affected by the thickness and grain size of the sheet. Because of this, conventional constitutive models are not suitable for predicting the material behavior in micro-forming processes. In this paper, a new constitutive model based on the Swift equation and considering size effect in micro-scale is presented to describe the strain-hardening behavior of the stainless steel 304 foil. Comparison of flow stress curves of specimens with different grain sizes showed that the prediction of material flow stress with the new constitutive model is improved compared to the existing model, especially at high strains, so that the average and maximum error of the new model is less than one-third and less than half of the conventional model error, respectively. Finite element simulation of the micro-tensile test was performed using the new constitutive model to investigate the size effect on the deformation behavior of the specimens. The new constitutive model was verified by comparing the results of experimental tests and finite element simulation of sheets with different grain sizes. Also, the results revealed that the estimation of the forming force using the new constitutive model is done with higher accuracy than the conventional and existing model for sheets with different grain sizes and high strain ranges.

Keywords Constitutive Model, Flow Stress Curve, Micro-Forming, Size Effect, Micro-Scale ...

CITATION LINKS

[1] Modeling of the size effects on the behavior of metals in ... [2] Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process ... [3] State of the art in micro forming. [4] Microforming technology: theory, simulation and practice. [5] The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. [6] The cleavage strength of polycrystals. [7] Analysis of micro/mesoscale sheet forming process with ... [8] Micro-scaled products development via microforming. [9] A constitutive model for thin sheet metal in micro-forming considering first order [10] Intrinsic effects due to the reduction of thickness on the mechanical behavior of nickel polycrystals. [11] Effects of specimen size and geometry in metal forming. [12] Experimental studies of the size effect affected microscale plastic deformation in micro upsetting process. [13] Size effects in thin sheet metal forming and its ... [14] The size effect on micro deformation behaviour in micro-scale plastic deformation. [15] Grain size effect of thickness/average grain size on mechanical behaviour. [16] A hybrid model for analysis of ductile fracture in ... [17] Study of deformation and ductile fracture behaviors in ... [18] ... Constitutive model based on dislocation density and. [19] An investigation on the formability of sheet metals in the micro/meso scale hydroforming process. [20] New Constitutive Model for the Size Effect on Flow Stress Based on the Energy Conservation Law. [21] Size effects on the tensile properties and deformation mechanism of commercial pure titanium foils. [22] Effect of plastic anisotropy on microscale ductile fracture and microformability of stainlesssteel foil. [23] Grain size effect on fracture behavior of the axis-tensile test of Inconel 718 sheet.

ارائه مدل ساختاری برای ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با در نظر گرفتن اثر اندازه در مقیاس میکرو

مهدی کریمی فیروزجائی

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت

مدرس، تهران، ایران

حسن مسلمی نائینی*

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت

مدرس، تهران، ایران

محمد مهدی کسائی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران

محمد جواد میرنیا

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی

نوشیروانی، بابل، ایران

چکیده

رفتار تغییرشکل ماده در فرآیندهای میکرو شکل‌دهی به علت وجود اثر اندازه متفاوت با مقیاس ماکرو است. اثر اندازه در مقیاس میکرو به علت وجود دانه‌های محدود در ناحیه تغییرشکل اتفاق می‌افتد و موجب می‌شود تا رفتار ماده متأثر از ضخامت و اندازه دانه ورق شود. به همین علت، مدل‌های ساختاری متداول توانایی پیش‌بینی رفتار ماده در فرآیندهای میکرو شکل‌دهی را ندارند. در این مقاله، مدل ساختاری جدید بر اساس معادله سوئیفت و با در نظر گرفتن اثر اندازه در مقیاس میکرو برای توصیف رفتار کرنش-سختی ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ ارائه گردید. ارزیابی منحنی جریان نمونه‌های با اندازه دانه مختلف نشان داد که پیش‌بینی تنش جریان ماده با مدل ساختاری جدید به خصوص در کرنش‌های بالا نسبت به مدل موجود بهبود می‌یابد، به‌طوری که میانگین و بیشینه خطای مدل جدید به ترتیب کمتر از یک سوم و کمتر از نصف خطای مدل متداول است. شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون کشش میکرو با به‌کارگیری مدل ساختاری جدید برای بررسی اثر اندازه روی رفتار تغییرشکل نمونه‌ها انجام شد. صحت مدل ساختاری جدید با مقایسه نتایج آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود ورق‌های با اندازه دانه مختلف مورد تایید قرار گرفت. هم‌چنین، نتایج آزمون کشش نشان داد که تخمین نیروی شکل‌دهی با استفاده از مدل جدید با دقت بالاتری نسبت به مدل‌های متداول و موجود برای ورق‌های با اندازه دانه مختلف و محدوده کرنش‌های بالا انجام می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مدل ساختاری، منحنی جریان، میکرو شکل‌دهی، اثر اندازه، مقیاس میکرو

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵

*نویسنده مسئول: moslemi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

کوچک‌سازی قطعات یک گرایش جهانی برای کمک به کاربرد محصولات در مقیاس میکرو و حرکت در جهت کاهش وزن، حجم، هزینه و آلودگی است. توسعه سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی، ابزارهای دقیق، وسایل ارتباطاتی، سامانه‌های میکروسیالاتی و تجهیزات پزشکی موجب پیشرفت قابل توجه روش‌های تولید و توسعه اصول تئوری حاکم در حوزه میکرو شده است. میکرو شکل‌دهی به عنوان یکی از روش‌های ساخت قطعات میکرو دارای

مزایایی از قبیل بهره‌وری بالا، سهولت ساخت هندسه‌های پیچیده، کاربرد برای محدوده وسیعی از مواد و خواص محصول عالی است. با این حال، هم‌چنان محدودیت‌های زیادی برای تولید انبوه قطعات میکرو وجود دارد.

عامل اصلی که باعث می‌شود تا دانش موجود در مقیاس ماکرو برای فرآیندهای میکرو شکل‌دهی قابل استفاده نباشد، اثر اندازه (Size effect) است. اثر اندازه به علت وجود تعداد دانه‌های محدود در ناحیه تغییرشکل اتفاق می‌افتد و از دو منبع متفاوت شامل اندازه دانه و اندازه نمونه ناشی می‌شود^[1]. منظور از اندازه نمونه، مقیاس هندسی قطعه کار است که در فرآیندهای شکل‌دهی ورق برابر با ضخامت ورق می‌باشد. اگر ابعاد قطعه در مقیاس ماکرو باشد و اندازه دانه‌ها ریز باشد، تعداد دانه‌های موجود در سطح مقطع قطعه زیاد است. هنگامی که ابعاد قطعه به مقیاس میکرو کاهش می‌یابد و اندازه دانه‌ها درشت می‌شود، تنها دانه‌های محدودی سطح مقطع قطعه را تشکیل می‌دهند. به این ترتیب، اثرپذیری رفتار ماده از اثر اندازه در مقیاس میکرو بیش‌تر می‌شود^[2]. در فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی هنگامی که نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق کم‌تر از ده باشد، اثر اندازه به‌وضوح قابل مشاهده است^[3].

مدل ساختاری برای توصیف رفتار تغییرشکل ماده شامل منحنی جریان می‌باشد که بر روی انتخاب فرآیند، طراحی قالب، دقت ابعادی و هندسی قطعه میکرو شکل‌دهی شده موثر است^[4]. تنش جریان ماده در مقیاس ماکرو وابسته به اندازه دانه و مستقل از ضخامت ورق است و از معادله هال-پچ (Hall-Petch)^[5,6] مطابق معادله ۱ پیروی می‌کند.

$$\sigma(\varepsilon, d) = \sigma_0 + K_{HP}(\varepsilon)/\sqrt{d} \quad (1)$$

که σ تنش جریان، σ_0 تنش تسلیم اولیه، ε کرنش، d اندازه دانه میانگین و K_{HP} پارامتر ماده در معادله هال-پچ است. اما تنش جریان ماده در مقیاس میکرو از معادله هال-پچ فاصله می‌گیرد و علاوه بر اندازه دانه وابسته به اندازه نمونه نیز می‌باشد. بنابراین، توسعه مدل ساختاری با در نظر گرفتن اثر هم‌زمان ضخامت و اندازه دانه ورق در فرآیندهای میکرو شکل‌دهی ضروری است. به‌طور کلی، تنش جریان ماده در مقیاس میکرو بین رفتار ماده تک‌کریستال و چندکریستال قرار می‌گیرد^[7] و با کاهش اندازه نمونه و افزایش اندازه دانه ورق کم می‌شود^[8,9].

توصیف اثر اندازه روی رفتار کرنش-سختی ماده در مقیاس میکرو با استفاده از دیدگاه‌های مختلفی قابل بیان است. در مدل لایه سطحی، اثر اندازه روی تنش جریان ناشی از رفتار متفاوت دانه‌های موجود در سطح با دانه‌های داخل ماده تعریف می‌شود. دانه‌های سطحی دارای محدودیت و قید کم‌تری در مقایسه با دانه‌های داخلی هستند^[10]. در نتیجه تنش جریان دانه‌های سطحی کم‌تر از

کردند که ساز و کار اثر اندازه روی تنش جریان ماده را نشان می‌دهد. بررسی تغییر شکل ورق مومل ۴۰۰ در آزمون کشش میکرو نشان داد که تنش جریان ماده با کاهش نسبت ضخامت به اندازه ورق، به علت اثر نرم‌شوندگی لایه سطحی کم می‌شود. ژو و همکاران^[19] شکل‌پذیری ورق‌های مسی با ضخامت و اندازه دانه مختلف را در فرایند هیدروفرمینگ در مقیاس میکرو بررسی کردند. ایشان برای تحلیل تغییر شکل ماده در مقیاس میکرو از مدل لایه سطحی که ورق را به دو قسمت لایه سطحی و بخش داخلی تقسیم می‌کند، استفاده کردند. برای بخش داخلی، هر دانه به دو قسمت درون دانه و مرز دانه تقسیم شده و اثر استحکام‌بخشی مرز دانه توسط مدل ساختاری مرکب در نظر گرفته شد. نتایج بررسی ایشان نشان داد که با نزدیک شدن اندازه دانه به ضخامت ورق، تنش جریان و شکل‌پذیری ماده کاهش می‌یابد.

توسعه مدل ساختاری برای کاربرد در مقیاس میکرو با اصلاح معادلات تنش جریان متداول نیز قابل انجام است. وانگ و همکاران^[9] مدل ساختاری بر مبنای معادله سوئیفت و با در نظر گرفتن اثر اندازه در مقیاس میکرو برای ورق نیکل ارائه کردند. ایشان نشان دادند که تنش جریان ماده در فرآیندهای میکرو شکل‌دهی ورق تابعی از نسبت ضخامت به اندازه دانه است. بر این اساس، ضریب کرنش-سختی در معادله سوئیفت را با در نظر گرفتن معادله هال-پچ، مدل لایه سطحی و مدل مرز دانه داخلی به صورت تابعی از نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق تعریف کردند. همچنین، چوانجی و همکاران^[20] با به‌کارگیری روش انرژی برای بهینه‌سازی عامل نمای کرنش-سختی در معادله سوئیفت توانستند دقت پیش‌بینی مدل را افزایش دهند. ونگ و همکاران^[21] معادله هولومن را برای توصیف رفتار کرنش-سختی ورق تیتانیوم در مقیاس میکرو اصلاح کردند. آن‌ها مشاهده کردند که تنش جریان نمونه‌های با نسبت ضخامت به اندازه دانه بزرگ‌تر از ۱۰ تنها تابع اندازه دانه ورق است. اما برای نمونه‌های با نسبت کم‌تر از ۱۰، معادله تنش جریان به شکل تابعی از نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق انطباق بهتری با نتایج آزمون‌های تجربی دارد. با توجه به اهمیت توسعه مدل ساختاری با در نظر گرفتن اثر اندازه که توانایی پیش‌بینی رفتار تغییر شکل ماده در مقیاس میکرو را داشته باشد، در این پژوهش مدل ساختاری جدید با در نظر گرفتن اثر اندازه برای ورق فولاد زنگ‌زن سری ۳۰۴ ارائه می‌شود. به علت کاربرد گسترده معادله سوئیفت برای توصیف منحنی جریان فلزات، مدل ساختاری جدید بر مبنای معادله سوئیفت توسعه داده می‌شود. همچنین، صحت مدل پیشنهادی با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون کشش میکرو و مقایسه نتایج آن با آزمون‌های تجربی سنجیده می‌شود.

دانه‌های داخلی ماده است^[11]. با کاهش اندازه نمونه و افزایش اندازه دانه، سهم دانه‌های سطحی نسبت به دانه‌های داخلی زیاد شده و تنش جریان ماده در مقیاس میکرو کاهش می‌یابد. در مدل مرز دانه داخلی، کرنش سختی ماده به علت سد شدن حرکت ناب‌جایی‌ها در پشت مرز دانه‌ها بیان می‌شود. با کاهش نسبت اندازه نمونه به اندازه دانه در مقیاس میکرو، نسبت مساحت سطح مرز دانه‌ها به حجم ماده کم می‌شود^[12]. بنابراین، اثر استحکام‌بخشی مرز دانه و در نتیجه تنش جریان ماده در میکرو شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

مطالعات اولیه در زمینه اثر اندازه در میکرو شکل‌دهی با بررسی جداگانه تاثیر اندازه نمونه یا اندازه دانه روی رفتار تغییر شکل ماده انجام شده است. پنگ و همکاران^[13] تابع تنش تسلیم وابسته به ضخامت ورق را به شکل تابع خطی شامل دو بخش مستقل از اثر اندازه و بخش وابسته به اثر اندازه ارائه کردند. ایشان در پژوهش دیگری^[7] با به‌کارگیری مدل ساختاری در شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند خم‌کاری نشان دادند که تخمین نیروی خم‌کاری بدون در نظر گرفتن اثر اندازه در مقیاس میکرو تفاوت زیادی با نتایج آزمون‌های تجربی دارد. چان و همکاران^[14] تغییر تنش جریان با تغییر اندازه نمونه در آزمون فشار را بررسی کردند و نشان دادند که تنش جریان ماده با کوچک شدن اندازه نمونه کاهش می‌یابد. همچنین، شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون فشار استوانه نشان داد که تعریف تنش جریان ماده با مدل لایه سطحی توانایی پیش‌بینی رفتار ماده در مقیاس میکرو را دارد. فنگ و همکاران^[15] اثر اندازه دانه روی رفتار تغییر شکل ماده در مقیاس میکرو را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که توانایی تغییر شکل مومسان ماده با کاهش اندازه دانه بیش‌تر می‌شود. همچنین، هنگامی که نسبت ضخامت به اندازه میانگین ورق به یک نزدیک می‌شود، رفتار تغییر شکل ماده به این نسبت وابستگی شدیدی دارد.

مطالعات اخیر در زمینه اثر اندازه روی رفتار تغییر شکل ماده با در نظر گرفتن اثر هم‌زمان اندازه نمونه و اندازه دانه انجام شده است. ران و فو^[16] با بررسی نمونه‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف نشان دادند که اندازه نمونه و اندازه دانه روی رفتار تغییر شکل مومسان مقیاس میکرو اثر متقابل دارند. بر این اساس، معادله تنش جریان وابسته به نسبت ضخامت به اندازه دانه ارائه کردند که توصیف بهتری از رفتار ورق برنجی در مقیاس میکرو ارائه می‌دهد. لای و همکاران^[17] مدل ساختاری شامل دو بخش وابسته به اثر اندازه و مستقل از آن را با ترکیب مدل لایه سطحی و مدل مرز دانه داخلی ارائه کردند. ایشان نسبت دانه‌های سطحی به کل دانه‌های ماده را به عنوان فاکتور مقیاس برای توصیف رفتار ماده با در نظر گرفتن اثر اندازه در نظر گرفتند. چوانجی و همکاران^[18] مدل ساختاری بر اساس تغییر چگالی ناب‌جایی در مقیاس میکرو ارائه

۲- مدل ساختاری با در نظر گرفتن اثر اندازه

منحنی جریان فلزات را می‌توان با استفاده از معادله سوئیفت مطابق معادله ۲ به خوبی تقریب زد.

$$\sigma(\varepsilon) = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (2)$$

که K ضریب کرنش-سختی، ε_0 کرنش اولیه و n نمای کرنش-سختی می‌باشد. برای نمونه‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف در مقیاس میکرو، مقادیر ضرایب K و n برای هر نمونه متفاوت است. به‌طور کلی، با کم شدن ضخامت یا بزرگ شدن اندازه دانه ورق، عامل K کاهش و پارامتر n افزایش می‌یابد. بنابراین، دقت پیش‌بینی رفتار ماده در مقیاس میکرو با استفاده از معادله سوئیفت علاوه بر این‌که تابعی از مقدار K است، مستقیماً تحت تاثیر عامل n می‌باشد و تغییر جزئی این عامل منجر به تغییرات شدید منحنی جریان می‌گردد.

مدل ساختاری بر مبنای معادله سوئیفت و با در نظر گرفتن اثر اندازه در مقیاس میکرو توسط وانگ و همکاران مطابق معادله ۳ ارائه شد [9].

$$\sigma(\varepsilon, t/d) = K_W(t/d)(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n = \left(a + b\sqrt{t/d} + c(t/d)^{-1}\right)(\varepsilon_0 + \varepsilon)^e \quad (3)$$

که K_W ضریب کرنش-سختی در مدل وانگ می‌باشد. ثابت‌های a ، b و c در معادله ۳ با استفاده از نمودار تنش-کرنش و به روش حداقل مربعات محاسبه می‌شوند و مقدار e برابر با میانگین نمای کرنش-سختی در معادله سوئیفت برای نمونه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که از معادله ۳ مشخص است، ضریب کرنش-سختی (K_W) وابسته به اثر اندازه و متغیر تعریف شده است. اما نمای کرنش-سختی (n) برای نمونه‌های با نسبت t/d متفاوت برابر با مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود. بررسی نتایج آزمون کشش در مقیاس میکرو (جدول ۲) نشان می‌دهد که با تغییر ضخامت و اندازه دانه ورق، عوامل ضریب و نمای کرنش-سختی به‌طور هم‌زمان تغییر می‌کنند. این موضوع موجب می‌شود تا مدل ساختاری پیشنهادی وانگ هنگام پیش‌بینی تنش جریان برای نمونه‌های با نسبت t/d متفاوت با مقداری خطا همراه شود. بنابراین، می‌توان با در نظر گرفتن تابع مناسب برای نمای کرنش-سختی، دقت پیش‌بینی مدل ساختاری پیشنهادی وانگ را بهبود بخشید. برای بهبود دقت پیش‌بینی مدل نیاز است تا نمای کرنش-سختی نیز وابسته به اثر اندازه (تابعی از ضخامت و اندازه دانه ورق) معرفی گردد.

در آزمون کشش تک‌محوری، شروع ناپایداری مومسان به صورت گلوئی (Necking) هنگام رخ می‌دهد که مشتق تنش نسبت به کرنش برابر با تنش گردد.

$$d\sigma/d\varepsilon = \sigma \quad (4)$$

در نتیجه با در نظر گرفتن معادله سوئیفت برای تنش جریان ماده و معادله ۴، نمای کرنش-سختی از معادله ۵ به دست می‌آید.

$$n = \varepsilon_0 + \varepsilon_n \quad (5)$$

که ε_n کرنش در نقطه شروع گلوئی است. مطابق معادله ۶، به عنوان یک تقریب می‌توان کرنش لحظه شکست را متناسب با کرنش شروع گلوئی نمونه در نظر گرفت [22]. مطابق نتایج تجربی ارائه شده در شکل ۳-الف، هیچ افتی در منحنی جریان نمونه‌های با اندازه دانه مختلف دیده نمی‌شود. بنابراین، تغییر شکل و در نهایت شکست نمونه‌ها در آزمون کشش تک‌محوری بدون وقوع گلوئی موضعی اتفاق افتاده است. در نتیجه، کرنش لحظه شکست به کرنش شروع گلوئی نزدیک است و این فرض تایید می‌شود.

$$\varepsilon_f \cong \varepsilon_n \quad (6)$$

که ε_f کرنش در نقطه شکست نمونه است. با توجه به معادله ۵ و ۶ نتیجه می‌شود که نمای کرنش-سختی با مقدار کرنش شکست متناسب است. نتایج آزمون‌های تجربی در شکل ۳-ب که ارتباط نمای کرنش-سختی با کرنش شکست ورق‌های با اندازه دانه مختلف را نشان می‌دهد نیز تایید کننده این فرض است.

$$n \propto \varepsilon_f \quad (7)$$

از سوی دیگر، طبق پژوهش لئو و همکاران [23] کرنش شکست در آزمون کشش تک‌محوری مقیاس میکرو، رابطه خطی با اندازه دانه ورق دارد و از معادله ۸ محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_0 + l_f/d = \varepsilon_0 + (l_f/t)(t/d) \quad (8)$$

که l_f مقداری ثابت می‌باشد. بنابراین، از معادله ۸ می‌توان نتیجه گرفت که کرنش شکست در مقیاس میکرو با نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق متناسب است.

$$\varepsilon_f \propto t/d \quad (9)$$

از روابط ۷ و ۹ نتیجه می‌شود که نمای کرنش-سختی با نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق متناسب است. بر این اساس، نمای کرنش-سختی در معادله سوئیفت با تابع خطی از نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق به صورت معادله ۱۰ پیشنهاد می‌شود.

$$n(t/d) = e + f \times (t/d) \quad (10)$$

در نهایت، مدل ساختاری جدید با در نظر گرفتن ضریب کرنش-سختی و نمای کرنش-سختی وابسته به نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق به شکل معادله ۱۱ ارائه می‌شود.

$$\sigma(\varepsilon, t/d) = K_N(t/d)(\varepsilon_0 + \varepsilon)^{n(t/d)} = \left(a + b\sqrt{t/d} + c(t/d)^{-1}\right)(\varepsilon_0 + \varepsilon)^{e+f(t/d)} \quad (11)$$

که K_N ضریب کرنش-سختی در مدل جدید می‌باشد. مقادیر ثابت‌های a ، b ، c ، e و f در معادله ۱۱ با استفاده از نمودار تنش کرنش و به روش حداقل مربعات محاسبه می‌شوند.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی ورق فولاد زنگ‌زن آستنیتی ۳۰۴

درصد وزنی عناصر (%)						
Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C
۸/۱۸	۱۸/۳۵	۰/۰۰۸	۰/۰۴	۰/۹۷	۰/۴۹	۰/۰۵۶

نتایج متالوگرافی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در هر چهار نمونه، نسبت ضخامت به اندازه دانه کمتر از ۱۰ پس از عملیات حرارتی ایجاد شده است. بنابراین، رفتار تغییرشکل ورق برای تمامی نمونه‌ها متأثر از اثر اندازه می‌باشد.

۳-۲- خواص مکانیکی ورق

نمونه‌های آزمون کشش تک‌محوری بر اساس استاندارد ASTM E8M طراحی شدند. هندسه نمونه آزمون کشش به همراه الگوی تصادفی سیاه و سفید پوشش‌دهی شده روی آن در شکل ۲-الف نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی ورق، در جهت نورد تهیه شدند. پس از آماده‌سازی نمونه، آزمون کشش به وسیله دستگاه اینسترون (Instron) با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. اندازه‌گیری کرنش حین آزمون کشش توسط سامانه برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال (DIC) و با استفاده از اکستنسومتر مجازی به طول ۲۵ میلی‌متر انجام شد. آزمون‌های کشش تک‌محوری برای هر کدام از شرایط ماده سه بار تکرار گردید. تجهیزات آزمون کشش تک‌محوری در شکل ۲-ب نشان داده شده است.

ضرایب n و K در معادله سوئیفت به روش حداقل مربعات محاسبه شدند. ضرایب معادله سوئیفت به همراه کرنش شکست نمونه‌ها در آزمون تجربی در جدول ۲ آورده شده است. تغییر هم‌زمان ضریب و نمای کرنش-سختی در معادله سوئیفت برای نمونه‌های

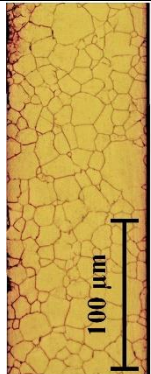
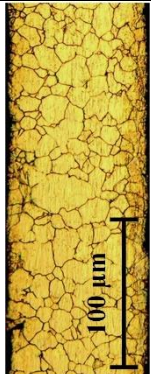
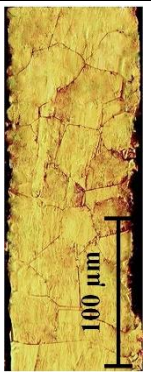
۳- آزمون تجربی

۳-۱- آماده‌سازی نمونه

در آزمایش‌های تجربی از ورق فولاد زنگ‌زن آستنیتی ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است استفاده شد.

برای بررسی اثر اندازه در مقیاس میکرو روی خواص مکانیکی ورق، عملیات حرارتی تابکاری (Annealing) برای ایجاد دانه‌بندی مختلف انجام شد. برای عملیات حرارتی از کوره القایی خلا مدل TF5/25-1250 با فشار هوا ۳-۱۰ پاسکال و نرخ حرارت‌دهی ۶۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه استفاده شد. ورق اولیه در محدوده دمایی ۹۰۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۰/۲۵ الی ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفت. برای جلوگیری از اکسید شدن نمونه‌ها حین خنک شدن در کوره از گاز محافظ آرگون استفاده شد.

برای بررسی اثر عملیات حرارتی آنیل بر روی دانه‌بندی ورق، ریزساختار ماده با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا سطح نمونه با استفاده از ورق سنباده و سپس با ذرات ساینده آلومینا با اندازه دانه ۰/۳ میکرومتر پولیش شد. برای آشکارسازی مرز دانه‌ها، مطابق با استاندارد ASTM E407 از روش حکاکی الکترولیتی (Electrolytic etching) با محلول نیتریک اسید ۶۰٪، ولتاژ ۱/۵ ولت و مدت زمان ۱۰ الی ۳۰ ثانیه استفاده گردید. بررسی ریزساختار نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ نوری مدل M51 OLYMPUS BX انجام گرفت. اندازه دانه میانگین مطابق با استاندارد ASTM E112 به روش خطوط متقاطع (Linear intercept) تعیین گردید. عوامل فرآیند عملیات حرارتی تابکاری و اندازه دانه میانگین متناظر به همراه ریزساختار مقطع ورق در راستای ضخامت در شکل ۱ آورده شده است.

نمونه	اولیه	۱	۲	۳	۴
دما (°C)	-	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۵۰
زمان (h)	-	۰/۲۵	۰/۲۵	۱	۲
اندازه دانه (μm)	۱۱/۵۸ ± ۱/۰۴	۱۱/۸۳ ± ۱/۶۵	۱۴/۸۸ ± ۱/۶۸	۳۰/۰۳ ± ۴/۳۰	۸۱/۶۷ ± ۲۹/۸۶
ضخامت = ۰/۱ میلی‌متر					

شکل ۱) ریزساختار ورق فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ برای عملیات حرارتی آنیل متفاوت

جدول ۲) تعیین عناصر جزئی ناخالص (درصد وزنی) از آنالیز طیف سنجی جذب اتمی

نمونه	نسبت t/d	K (MPa)	n	ϵ_0	ϵ_f
۱	۸/۴۵	۱۹۵۶/۹۳۹	۰/۶۲۳	۰/۰۵۶	۰/۴۶
۲	۶/۷۲	۱۸۶۶/۶۱۷	۰/۶۳۰	۰/۰۵۶	۰/۳۹
۳	۴/۳۳	۱۷۲۰/۰۸۵	۰/۶۴۸	۰/۰۵۶	۰/۳۸
۴	۱/۲۲	۱۶۸۱/۲۱۲	۰/۶۶۵	۰/۰۵۶	۰/۳۳

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

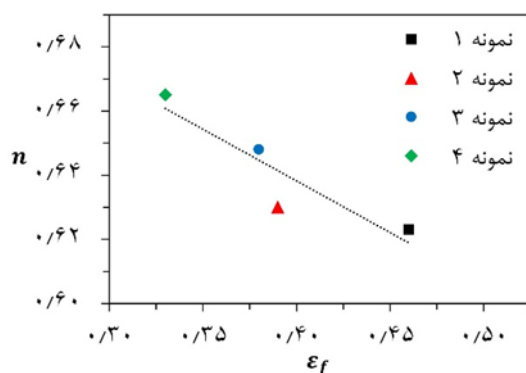
برای شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون کشش از حل‌گر دینامیک صریح نرم‌افزار اباکوس ۶/۱۴ استفاده شد. با توجه به شبه‌استاتیک بودن فرآیند، زمان شبیه‌سازی تا جایی کاهش داده شد که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی کم‌تر از یک درصد باقی بماند. یک انتهای نمونه در تمام جهات مقید گردید و نقطه‌ای در انتهای دیگر نمونه به عنوان نقطه مرجع در نظر گرفته شد و بارگذاری از طریق اعمال جابه‌جایی به نقطه مرجع انجام پذیرفت.

ورق با سه اجزا در راستای ضخامت به صورت کشسان-مومسان با استفاده از اجزا سالیید (Solid) هشت گرهی C3D8R مدل شد. اندازه اجزادر قسمت میانی ورق ۰/۱ میلی‌متر و در سایر قسمت‌های ورق برابر با ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مدول کشسانی برابر با ۱۹۷/۳۲ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شد. معیار تسلیم همسانگرد فون میز برای پیش‌بینی آغاز تغییر شکل مومسان و قانون سخت‌شوندگی همسانگرد برای مدل‌سازی رفتار سخت‌شوندگی ماده مورد استفاده قرار گرفت. منحنی جریان در محدوده مومسان با استفاده از زیربرنامه VUHARD در نرم‌افزار تعریف گردید. شرایط مرزی و نحوه شبکه‌بندی نمونه آزمون کشش تک‌محوری در شبیه‌سازی اجزای محدود در شکل ۴ نمایش داده شده است.

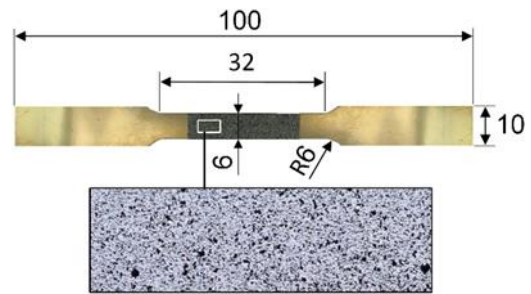
۵- نتایج و بحث

۵-۱- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

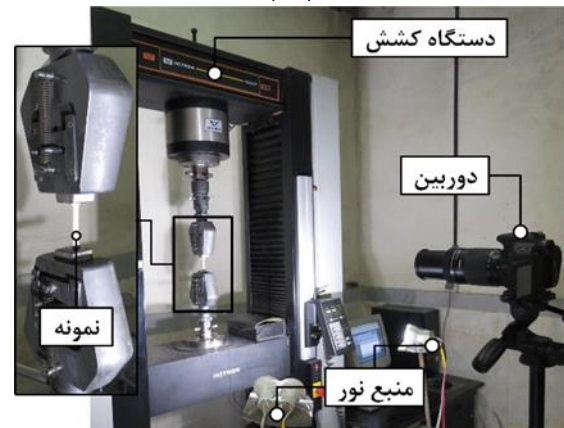
به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، نمودار



(ب)



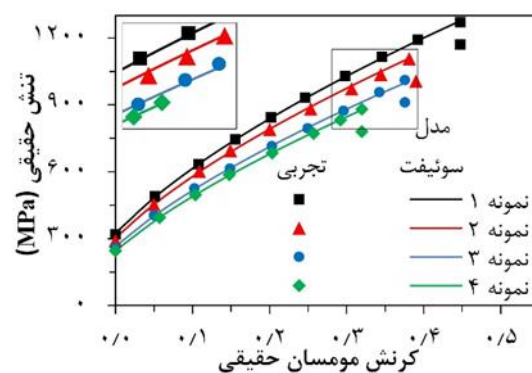
(الف)



(ب)

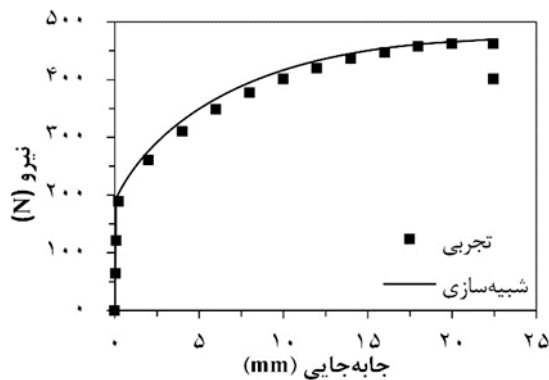
شکل ۲) ابعاد هندسی نمونه آزمون کشش تک‌محوری ب- تجهیزات آزمون کشش تک‌محوری

با اندازه دانه مختلف در جدول ۲ مشاهده می‌شود. منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده برای نمونه‌های با اندازه دانه مختلف در شکل ۳-الف آورده شده است. با توجه به شکل ۳-الف مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق، کرنش‌سختی ماده کاهش یافته و منحنی جریان آن پایین‌تر قرار می‌گیرد. همچنین ارتباط نمای کرنش-سختی با کرنش شکست نمونه‌ها در شکل ۳-ب نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمای کرنش-سختی با کرنش شکست نمونه‌ها متناسب بوده و رابطه خطی با آن دارد.



(الف)

شکل ۳) الف- نمودار تنش حقیقی-کرنش مومسان حقیقی ب- ارتباط نمای کرنش-سختی با کرنش شکست



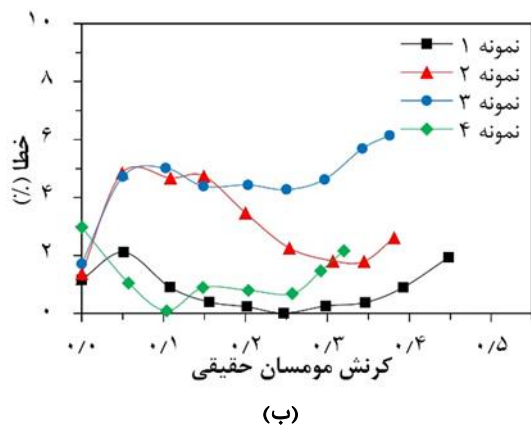
شکل ۵) نمودار نیرو-جابه‌جایی فک دستگاه در آزمون تجربی و نقطه مرجع در شبیه‌سازی

جدول ۳) پارامترهای ماده برای مدل پیشنهادی وانگ و مدل جدید

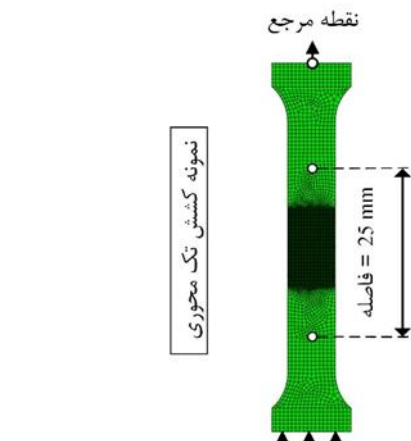
f	e	c	b	a
-	۰/۶۴۴	۶۰۸/۸۱۱	۴۵۶/۶۰۳	۶۱۳/۹۸۴
مدل وانگ				
-۰/۰۰۶	۰/۶۷۳	۶۸۰/۵۰۰	۴۱۸/۸۹۱	۶۵۹/۸۰۳
مدل جدید				

دارد. با این حال، اختلاف بین پیش‌بینی مدل وانگ با نتایج تجربی نمونه‌های ۲ و ۳ بیش‌تر می‌شود. همچنین، با بررسی خطای پیش‌بینی مدل پیشنهادی وانگ در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود که مقدار خطا در کرنش‌های بالاتر از ۰/۲۵ روند صعودی دارد. در واقع با کاهش نسبت t/d ورق، تنش جریان ماده در مقیاس میکرو کاهش می‌یابد. بنابراین، سطح نمودار تنش حقیقی-کرنش مومسان حقیقی با کاهش نسبت t/d پایین‌تر می‌آید که با کاهش ضریب n همراه است. مدل ساختاری پیشنهادی وانگ به علت ثابت فرض کردن ضریب n نمی‌تواند کاهش تنش جریان ماده را به خوبی تقریب بزند و این موضوع موجب بروز خطای پیش‌بینی می‌گردد.

مقایسه تنش جریان بین نتایج تجربی و مدل ساختاری جدید در شکل ۷-الف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ساختاری جدید علاوه بر این‌که تطابق خوبی با نتایج تجربی نمونه‌های ۱ و ۴ دارد، می‌تواند منحنی جریان نمونه‌های ۲ و ۳ را



(ب)



شکل ۴) شرایط مرزی و شبکه‌بندی نمونه کشش تک محوری

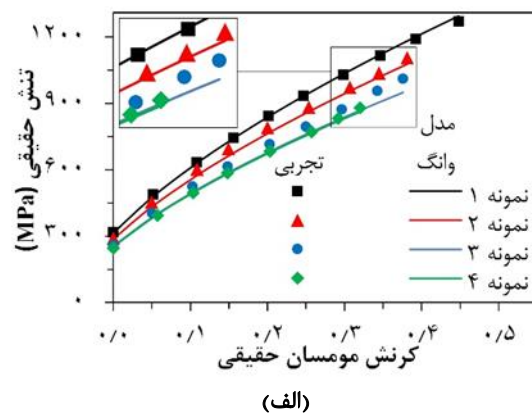
نیرو-جابه‌جایی فک دستگاه در آزمون‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور از نتایج آزمون کشش ورق اولیه بدون عملیات حرارتی استفاده گردید. با توجه به این‌که اختلاف نتایج شبیه‌سازی و تجربی که در شکل ۵ نشان داده شده است کم‌تر از سه درصد است، می‌توان به صحت نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود اطمینان کرد.

۵-۲- تعیین ضرایب مدل ساختاری

نمونه‌های ۱ و ۴ به‌طور تصادفی برای تعیین ضرایب ثابت معادله در نرم‌افزار متلب (MATLAB) به روش بهینه‌سازی حداقل مربعات غیرخطی انتخاب شدند. ضرایب ثابت برای مدل پیشنهادی وانگ و مدل جدید در جدول ۳ آورده شده است.

۵-۳- صحت‌سنجی مدل ساختاری

مقایسه تنش جریان بین نتایج تجربی و مدل ساختاری پیشنهادی وانگ در شکل ۶-الف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین منحنی پیشنهادی وانگ با نتایج تجربی نمونه‌های ۱ و ۴ که برای تعیین ضرایب مدل انتخاب شدند، وجود



(الف)

شکل ۶) الف- مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی مدل پیشنهادی وانگ ب- خطای مدل پیشنهادی وانگ

جدید و بیشینه خطای مدل پیشنهادی وانگ بیش از دو برابر مدل جدید است. بنابراین، مدل ساختاری ارائه شده کارایی بهتری برای پیش‌بینی رفتار کرنش-سختی ماده در مقیاس میکرو به ازای مقادیر مختلف t/d در مقایسه با مدل موجود دارد.

۴-۵- ارزیابی مدل ساختاری در آزمون کشش میکرو

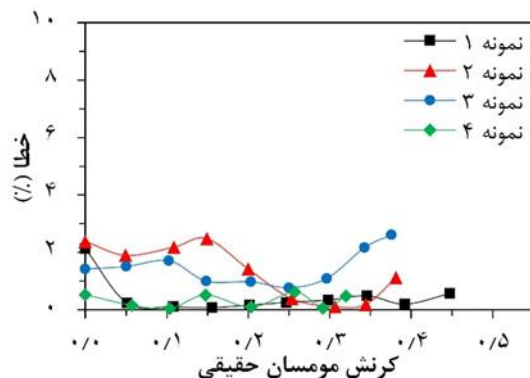
شبیه‌سازی آزمون کشش تک‌محوری با استفاده از منحنی‌های جریان مختلف انجام شد و منحنی نیرو-جاب‌جایی نقطه مرجع برای نمونه‌های ۲ و ۳ در شکل ۸ آورده شده است. برای شبیه‌سازی آزمون کشش با مدل متداول که اثر اندازه در مقیاس میکرو را در نظر نمی‌گیرد از معادله سوئیفت برای ورق اولیه بدون عملیات حرارتی استفاده شد. شبیه‌سازی آزمون کشش با مدل وانگ و مدل جدید به ترتیب با استفاده از مدل ساختاری مطابق معادله ۳ و معادله ۱۱ به همراه ضرایب جدول ۳ انجام شد.

نیز به خوبی پیش‌بینی کند. همچنین، بررسی خطای پیش‌بینی مدل جدید در شکل ۷-ب نشان می‌دهد که میزان خطا برای تمامی نمونه‌ها نسبت به مدل ساختاری پیشنهادی وانگ کم‌تر شده است و مقدار خطای پیش‌بینی مدل جدید حتی در کرنش‌های بالا همواره کم‌تر از سه درصد است. با توجه به این که در معادله تنش جریان جدید ضرایب K و n هر دو تابعی از ضخامت و اندازه دانه ورق می‌باشند، مدل ساختاری جدید توانایی پیش‌بینی بهتری برای نمونه‌های با نسبت t/d مختلف دارد. بنابراین، اصلاح نمای کرنش-سختی در معادله سوئیفت به صورت تابعی از نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق موجب بهبود دقت مدل ساختاری جدید می‌گردد.

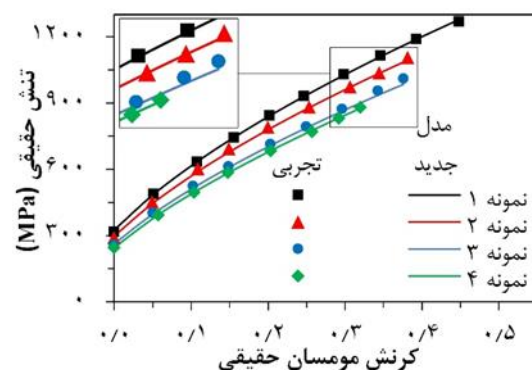
نتایج میانگین و بیشینه خطای پیش‌بینی برای مدل پیشنهادی وانگ و مدل جدید در جدول ۴ آورده شده است. ارزیابی کارایی مدل‌ها برای پیش‌بینی تنش جریان نمونه‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که میانگین خطای مدل پیشنهادی وانگ سه برابر مدل

جدول ۴) مقایسه خطای پیش‌بینی مدل وانگ و مدل جدید

	نمونه ۱		نمونه ۲		نمونه ۳		نمونه ۴	
	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه
مدل وانگ	۰/۹۱	۳/۵۰	۳/۰۹	۵/۴۰	۴/۱۵	۶/۱۴	۰/۸۲	۲/۹۷
مدل جدید	۰/۴۱	۲/۱۲	۱/۲۵	۲/۵۸	۱/۲۴	۲/۶۱	۰/۲۸	۱/۱۳

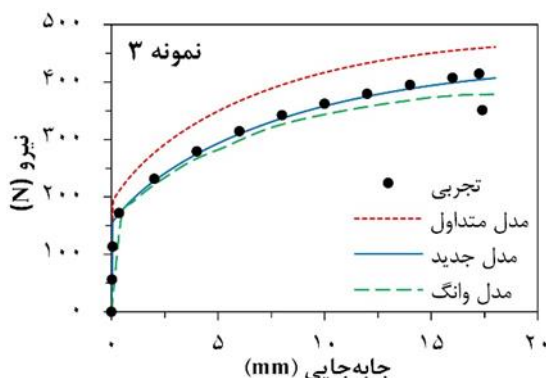


(ب)

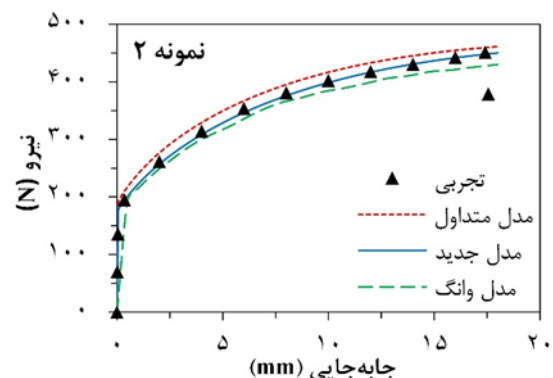


(الف)

شکل ۷) الف- مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی مدل جدید ب- خطای مدل جدید



(ب)



(الف)

شکل ۸) مقایسه منحنی نیرو-جاب‌جایی فک دستگاه در آزمون کشش برای الف- نمونه ۲ ب- نمونه ۳

تغییر شکل ماده را برای ورق‌های با اندازه دانه مختلف تا محدوده کرنش‌های بالا به خوبی پیش‌بینی نماید.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده ایشان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر با هیچ شخص یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

منابع مالی: توسط نویسندگان تأمین شده است.

فهرست نمادها و نشانه‌ها

σ	تنش جریان
ε	کرنش
ε_n	کرنش مومسان معادل در نقطه گلوپی
ε_f	کرنش مومسان معادل در نقطه شکست
t	ضخامت ورق
d	اندازه دانه میانگین
K	ضریب کرنش-سختی در معادله سوئیفت
n	نمای کرنش-سختی
ε_0	کرنش اولیه
K_{HP}	پارامتر ماده مرتبط با مدل هال-پچ
σ_0	پارامتر ماده مرتبط با مدل هال-پچ
K_W	ضریب کرنش-سختی در مدل پیشنهادی وانگ
K_N	ضریب کرنش-سختی در مدل جدید
a	ثابت ماده در معادله تنش جریان
b	ثابت ماده در معادله تنش جریان
c	ثابت ماده در معادله تنش جریان
e	ثابت ماده در معادله تنش جریان
f	ثابت ماده در معادله تنش جریان

منابع

- Kim GY, Ni J, Koc M. Modeling of the size effects on the behavior of metals in microscale deformation processes.
- Lai X, Peng L, Hu P, Lan S, Ni J. Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process with considering size/scale effects. Computational Materials Science. 2008;43(4):1003-9.
- Vollertsen F, Niehoff HS, Hu Z. State of the art in micro forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006;46(11):1172-9.
- Jiang Z, Zhao J, Xie H. Microforming technology: theory, simulation and practice. Academic Press; 2017.
- Hall EO. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. Proceedings of the Physical Society. Section B. 1951;64(9):747.
- Petch NJ. The cleavage strength of polycrystals. Journal of the iron and steel institute. 1953;174:25-8.
- Peng L, Lai X, Lee HJ, Song JH, Ni J. Analysis of micro/mesoscale sheet forming process with uniform size dependent material constitutive model. Materials science and engineering: A. 2009;526(1-2):93-9.

نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی رفتار ماده با استفاده از مدل ساختاری متداول با خطا همراه بوده و میزان خطای پیش‌بینی با کوچک شدن نسبت t/d افزایش چشم‌گیری می‌یابد. در واقع، تنش جریان ماده با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه ورق کاهش می‌یابد. مدل متداول به علت چشم‌پوشی از اثر اندازه، توانایی پیش‌بینی این رفتار ماده در مقیاس میکرو را ندارد. از سوی دیگر، مدل پیشنهادی وانگ نیروی شکل‌دهی را کم‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زند و میزان خطای پیش‌بینی با افزایش طول کورس حرکت فک دستگاه نیز بیش‌تر می‌شود. بنابراین، اگرچه مدل ساختاری پیشنهادی وانگ برای مقادیر کرنش‌های کم پیش‌بینی نسبتاً دقیقی برای ورق‌های با نسبت t/d مختلف ارائه می‌دهد، اما در کرنش‌های بالا پیش‌بینی آن با خطا همراه می‌شود. در نهایت، مدل ساختاری جدید انطباق خوبی با نتایج تجربی ورق‌های با اندازه دانه مختلف دارد و پیش‌بینی دقیق‌تری از رفتار تغییر شکل ماده در محدوده کرنش‌های بالا نیز ارائه می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر اندازه روی رفتار تغییر شکل ورق فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ در مقیاس میکرو با استفاده از مدل‌های ساختاری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، مدل ساختاری جدید با در نظر گرفتن اثر اندازه در مقیاس میکرو بر مبنای معادله سوئیفت توسعه داده شد. نتایج نشان داد:

۱- تنش جریان ماده با کاهش نسبت ضخامت به اندازه دانه ورق کم می‌شود و منحنی جریان ماده در مقیاس میکرو با کاهش نسبت ضخامت به اندازه دانه پایین‌تر قرار می‌گیرد. افت تنش جریان ماده در مقیاس میکرو موجب تغییر هم‌زمان عوامل ضریب کرنش-سختی و نمای کرنش-سختی در معادله تنش جریان سوئیفت می‌گردد. بنابراین، مدل‌های ساختاری متداول توانایی پیش‌بینی رفتار ورق‌های با ضخامت و اندازه دانه مختلف در مقیاس میکرو را ندارند.

۲- پیش‌بینی مدل ساختاری پیشنهادی وانگ انطباق خوبی با نتایج تجربی نمونه‌های با نسبت ضخامت به اندازه دانه مختلف در مقادیر کرنش‌های پایین دارد. اما میزان خطای پیش‌بینی این مدل در کرنش‌های بالا به علت ثابت فرض کردن نمای کرنش-سختی افزایش یافته و روند صعودی دارد.

۳- دقت پیش‌بینی منحنی جریان با استفاده از مدل ساختاری جدید بهبود یافت. بر این اساس، میانگین و بیشینه خطای پیش‌بینی مدل جدید برای ورق‌های با نسبت ضخامت به اندازه دانه مختلف به ترتیب کم‌تر از یک درصد و کم‌تر از سه درصد حاصل شد.

۴- مدل ساختاری جدید با استفاده از مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود با آزمون‌های تجربی صحت‌سنجی گردید. نتایج آزمون کشش تک‌محوری نشان داد که مدل جدید می‌تواند رفتار

- commercial pure titanium foils. *Materials Science and Engineering: A*. 2018 ;730:244-61.
- 22-Meng B, Zhang YY, Cheng C, Han JQ, Wan M. Effect of plastic anisotropy on microscale ductile fracture and microformability of stainless steel foil. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018 ;148:620-35.
- 23-Liu BB, Han JQ, Zhao R, Liu W, Wan M. Grain size effect on fracture behavior of the axis-tensile test of Inconel 718 sheet. *High Temperature Materials and Processes*. 2016 ;35(10):989-98.
- 8- Fu MW, Chan WL. *Micro-scaled products development via microforming*. Springer series in advanced manufacturing, Springer, London; 2014.
- 9- Yun W, Peilong D, Zhenying X, Hua Y, Jiangping W, Jingjing W. A constitutive model for thin sheet metal in micro-forming considering first order size effects. *Materials & Design*. 2010 ;31(2):1010-4.
- 10- Hug E, Keller C. Intrinsic effects due to the reduction of thickness on the mechanical behavior of nickel polycrystals. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010 ;41(10):2498-506.
- 11-Kals R, Pucher HJ, Vollertsen F. Effects of specimen size and geometry in metal forming. In *Proceedings of the 2nd international conference on advances in materials and processing technologies 1995* (Vol. 3, pp. 1288-1297).
- 12-Chan WL, Fu MW, Yang B. Experimental studies of the size effect affected microscale plastic deformation in micro upsetting process. *Materials Science and Engineering: A*. 2012 ;534:374-83.
- 13-Peng L, Liu F, Ni J, Lai X. Size effects in thin sheet metal forming and its elastic-plastic constitutive model. *Materials & design*. 2007 ;28(5):1731-6.
- 14-Chan WL, Fu MW, Lu J. The size effect on micro deformation behaviour in micro-scale plastic deformation. *Materials & Design*. 2011 ;32(1):198-206.
- 15-Fang Z, Jiang Z, Wang X, Zhou C, Wei D, Liu X. Grain size effect of thickness/average grain size on mechanical behaviour, fracture mechanism and constitutive model for phosphor bronze foil. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;79(9):1905-14.
- 16-Ran, J. and M. Fu, A hybrid model for analysis of ductile fracture in micro-scaled plastic deformation of multiphase alloys. *International Journal of Plasticity*, 2014. 61: p. 1-16.
- 17-Li WT, Fu MW, Shi SQ. Study of deformation and ductile fracture behaviors in micro-scale deformation using a combined surface layer and grain boundary strengthening model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017 ;131:924-37.
- 18-Wang C, Xue S, Chen G, Zhang P. Constitutive model based on dislocation density and ductile fracture of Monel 400 thin sheet under tension. *Metals and Materials International*. 2017;23(2):264-71.
- 19-Xu Z, Peng L, Yi P, Lai X. An investigation on the formability of sheet metals in the micro/meso scale hydroforming process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019 ;150:265-76.
- 20-Wang C, Wang H, Chen G, Zhu Q, Cui L, Zhang P, Dong A. New Constitutive Model for the Size Effect on Flow Stress Based on the Energy Conservation Law. *Materials*. 2020;13(11):2617.
- 21-Wang S, Niu L, Chen C, Pang Y, Liao B, Zhong ZH, Lu P, Li P, Wu XD, Coenen JW, Cao LF. Size effects on the tensile properties and deformation mechanism of