شبيه­سازي و ساخت قالب كشش عميق قطعه پوسته كاتاليست انبارك اگزوز

سامان خليل پورآذري1

1- استاديار، گروه مهندسي ساخت و توليد، دانشكده انرژي­هاي تجديدپذير، دانشگاه صنعتي اروميه، اروميه

\* اروميه، صندوق پستی 419-57155، s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

چکیده

امروزه براي اطمينان از عدم وقوع عيوب در قطعات توليد شده در فرآيندهاي شكل­دهي ورق و كاستن از هزينه­هاي دوباره­كاري يا حذف خطاهاي توليدي به صورت وسيعي از نرم­افزارهاي تحليل و آناليز شكل­دهي ورق استفاده مي­گردد. پيچيدگي فرآيند کشش عميق به واسطه پارامترهاي ورودي آن نظير هندسه صحيح سنبه و ماتريس، ميزان کشش­پذيري ورق اوليه، نيروي ورق­گير، ميزان اصطکاک، تناژ پرس و نيز احتمال ايجاد عيوبي همچون چين­خوردگي و پارگي نياز به اجراي شبيه­سازي فرآيند را با در نظر گرفتن تمام جنبه­هاي اجرايي آن ضروري نموده است. در اين تحقيق نرم­افزار فرمينگ سوئيت براي پيش­بيني فرآيند کشش عميق ورق فولاد ضدزنگ 304L در توليد پوسته کاتاليست انبارك اگزوز استفاده شده است. به اين منظور ابتدا مدل سه­بعدي از پوسته كاتاليست در نرم­افزار طراحي ساليدوركس ترسيم و سپس به نرم­افزار فرمينگ سوئيت منتقل گرديد تا تحليل­هاي موردنياز براي پارامترهاي فرآيند کشش عميق بر روي آن انجام گيرد. با توجه به نتايج تحليل در نرم­افزار، تغييرات ضروري به صورت پيوسته بر روي مدل سه­بعدي سنبه و ماتريس انجام گرفته و با تأييد شبيه­سازي اجراي فرآيند كشش عميق در نرم­افزار، مرحله ماشينكاري و توليد قالب آغاز گرديد. نتايج به دست آمده از شبيه­سازي فرآيند و توليد نمونه واقعي نشان مي­دهد که نرم­افزار فرمينگ سوئيت از دقت بالايي در برآورد ميزان نيروي لازم براي اجراي فرآيند و همچنين حصول به دقت ابعادي موردنظر برخوردار است. به عبارت ديگر فرآيند شبيه­سازي در نرم­افزار، به شناسايي مناسب عيوب در قطعات كشش عميق و رفع آنها قبل از توليد انبوه كمك شاياني نموده است.

**کلی**د‌واژگ**ان**

كشش عميق، شبيه­سازي، فرمينگ سوئيت، فولاد ضدزنگ

Simulation and manufacturing the deep drawing die of the of exhaust storage catalyst

Saman Khalilpourazary1

1- Renewable Department, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

\* P.O.B. 57155-419, Urmia, Iran, s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

Abstract

Nowadays, to ensure the elimination of defects during the manufacturing processes and to reduce the cost of reprocessing or modifying production errors, different types of software are widely used for the analysis of the sheet metal forming processes. According to the complexity of the deep drawing process due to its input parameters such as the geometry of the mandrel and matrix, and the possibility of defects occurrence such as wrinkling and tearing, the simulation of this process is very important. In this research, forming suite software has been employed to simulate the deep drawing process of the exhaust storage catalyst that is made from stainless steel 304L. For this purpose, a 3D model of the exhaust storage catalyst was drawn in SolidWorks software and then transferred to the Forming Suite software to perform the required analyzes of the deep drawing process parameters. According to the achieved results, the changes were made continuously on the 3D model of the mandrel and the matrix, and after the final approval of the simulation in the software, the machining of the dies began. The results obtained from the process simulation and the real production show that the Forming Suite software has high accuracy in estimating the amount of force required to implement the process and also achieving the desired dimensional accuracy. In other words, the simulation of the process has helped to properly identify defects during the deep drawing process and eliminate them before mass production.

Keywords

Deep drawing, Simulation, Forming suite, Stainless steel

1. مقدمه

فرآيند کشش عمیق نوعی عمليات فلزکاری است که برای شکل­دادن ورق­هاي تخت و تبدیل آنها به محصولات فنجانی شکل به کار می­‌رود. این عمل با قرار دادن ورق فلزي به اندازه مناسب روی ماتريس شکل­دار و فشار دادن آن به داخل ماتريس با اعمال فشار توسط يك سنبه انجام می­‌شود]1[. البته در بيشتر موارد عمق کشيدگي ورق به داخل ماتريس فرم­دهنده از قطر اوليه بلنک ورق شکل بيشتر است]2[. در اين فرآيند شكل­دهي نيز پارامترهاي ورودي فرآيند نظير ميزان نيروي ورق­گير، ميزان فشار سنبه، هندسه ماتريس مورد استفاده، جنس ورق فلزي و ويژگي­­هاي مكانيكي و متالوژيكي آن به طور مستقيم بر كيفيت قطعات توليد شده مؤثر بوده و انتخاب نادرست آنها باعث ايجاد عيوبي نظير چروکيدگي و پارگي در حين اجراي فرآيند کشش ورق مي­گردد]3[. از اين رو عمليات کشش عميق، يک فرآيند شكل­دهي پيچيده محسوب شده و نمي­توان به راحتي يک مدل ساده رياضي يا كامپيوتري را براي تحليل آن ارائه نمود]4[. به همين دليل بيشتر تحقيقات انجام گرفته در زمينه فرآيند كشش عميق بر بهينه­سازي و توسعه تئوري­هاي مختلف پلاستيسيته در راستاي کاهش احتمال وقوع عيب در حين اجراي فرآيند کشش عميق و کاستن از هزينه­هاي توليد متمركز بوده است]5، 6[. در سال 2002 کيشور و کومار از روش تحليل المان محدود به منظور بهينه­سازي شکل بلنک اوليه براي کاهش مقدار گوشواره­اي شدن ورق در فرآيند کشش عميق استفاده نمود]7[. گانتار و همکاران نيز راهکارهايي را به منظور ارزيابي و بهينه­سازي پارامترهاي ورودي در فرآيند کشش عميق ارائه کرده­اند]8[.

به تدريج با افزايش کاربرد کامپيوتر در مهندسي مکانيک، نرم­افزارهاي مختلفي براي شبيه­سازي و نظارت بر نحوه تغيير شكل ورق در حين فرآيندهاي شكل­دهي ارائه گرديد]9[. به عبارت ديگر مهندسين طراح مي­توانند فرآيند واقعي شكل­دهي را در يك نرم­افزار شبيه­سازي نموده و از طريق درك ماهيت تغيير شكل و رفتار پلاستيكي ورق عيوب احتمالي را پيش­بيني و قبل از توليد واقعي سنبه و ماتريس آن را تصحيح نمايند. اجراي اين كار ضمن حذف پديده آزمون و خطا سبب اجراي دقيق فرآيند شکل­دهی شده و خطاها و هزينه­هاي ناشي از آنها را در مرحله توليد تا حد زيادي كاهش مي­دهد. در اين راستا نسل جديدي از نرم­افزارها ارائه گرديده است که تمامي مراحل طراحي تا اجراي گرافيكي فرآيند شكل­دهي ورق نظير فرآيند كشش عميق را به صورت مجازي شبيه­سازي نموده و تمرکز آنها بر بهبود زمان و صرفه­جويي در هزينه توليد مي­باشد. از نرم­افزارهاي مورد استفاده در زمينه شکل­دهي ورق­هاي فلزي مي­توان به اتوفرم[[1]](#footnote-1)، هايپر فرم فَست[[2]](#footnote-2)، اُپن فرم[[3]](#footnote-3) و داينافرم[[4]](#footnote-4) و نرم­­افزارهاي تحليلي نظير آباكوس[[5]](#footnote-5) اشاره کرد. به طور مثال موراني و همکاران ارتباط بين نيرو وكورس سنبه در فرآيند كشش عميق توسط نرم­افزار آباكوس شبيه­سازي کرده و نشان دادند که اين عامل متأثر از ميزان لقي بين سنبه و ماتريس و نيز نسبت کشش است]10[. هاداگ و همکاران نيز براي بهبود روند پيش­بيني اثرات و پديده­هاي نامطلوب مانند برگشت فنري و رفتار پلاستيکي در کشش عميق از نرم­افزار هايپر فُرم فَست براي شبيه­سازي اين فرآيند استفاده نمودند]11[. تحقيقات هاري­هان و بالاجي نيز در رابطه با يافتن روشي براي کاهش اندازه مواد خام مورد استفاده در فرآيند كشش عميق براي توليد قطعات در صنايع اتومبيل با تيراژ بالا متمركز بوده است كه در آن با استفاده از نرم­افزار اُپن فرم نشان داده شد كه كاربرد روش بهينه­سازي پيشنهاد شده مي­تواند صرفه­جويي زيادي در وزن قطعات توليد شده ايجاد نمايد ]12[. فرمينگ سوئيت[[6]](#footnote-6) يکي ديگر از نرم­افزارهاي پيشرفته در زمينه شكل­دهي ورق­هاي فلزي است که علاوه بر دارا بودن قابليت شبيه­سازي و بررسي فرآيندهاي شکل­دهي ورق، در زمينه برنامه­ريزي فرآيند براي خط توليد در فرآيندهاي شكل­دهي ورق نيز قادر به ارائه نتايج قابل قبول است. اولين نسخه اين نرم­افزار در سال 1989 با نام تجاري اِف- تي- آي به بازار عرضه گرديد و با گذشت زمان به قابليت­ها و ابزارهاي اين نرم­افزار افزوده و تغييرات گسترد­ه­اي در جهت تکميل آن صورت گرفت. از زمينه­هاي کاربردي اين نرم­افزار در فرآيندهاي شکل­دهي ورق­ مي­توان به پتانسيل بالاي آن براي انجام محاسبات مربوط به مدل اوليه و درصد بازدهي ورق، ترسيم نمودار اِف- ال- دي با پيش­بيني درصد کاهش ضخامت مواد به کمک آناليز المان محدود، برآورد هزينه نهايي توليد، بهينه­سازي هزينه توليد، شبيه­سازي انجام فرآيند، محاسبه ابعاد بلنک اوليه و قابليت تجزيه و تحليل مقادير نيرو در سنبه، ماتريس و ورق­گير اشاره کرد. در اين مقاله فرآيند کشش عميق ورق از جنس فولاد ضدزنگ 304L براي توليد پوسته کاتاليست با ضخامت يک و نيم ميليمتر توسط نرم­افزار فرمينگ سوئيت تحليل و قالب­هاي نهايي مطابق با شبيه­سازي انجام گرفته به صورت عملي توليد گرديد.

2- روش تحقيق

در اين تحقيق فرآيند كشش عميق ورق فلزي با ضخامت یک و نیم میلیمتر از جنس فولاد ضدزنگ 304L براي توليد پوسته کاتالیست انبارک اگزوز مورد بررسی قرارگرفته است. از پوسته كاتاليست براي مونتاژ انبارك اگزوز به همراه فیلترهای ضد آلایندگی و صدا در مسیر گازهای خروجی از اگزوز خودروها استفاده مي­شود. به اين ترتيب که مابين دو پوسته کاتاليست مشابه كه در اين تحقيق توليد شده است، مواد سراميکي جاذب آلودگي و صدا قرار داده شده و سپس پوسته­هاي کاتاليست به صورت لب به لب با استفاده از جوش آرگون به هم جوش داده مي­شوند. در جدول 1 ويژگي­هاي مكانيكي ورق فولاد ضدزنگ مورد استفاده ارائه شده است.

**جدول 1** خصوصيات مكانيكي فولار ضدزنگ 304L

|  |  |
| --- | --- |
| مقدار | پارامتر |
| 8000 | چگالي |
| 265/0 | ضريب پواسون |
| 192  | مدول يانگ (گیگا پاسکال) |
| 317/241 | تنش تسليم (مگا پاسکال) |
| 897/585 | تنش نهايي (مگا پاسکال)  |

براي انجام شبيه­سازي فرآيند كشش عميق جهت توليد قطعه پوسته کاتاليست از نرم­افزار فرمينگ سوئيت استفاده گرديد كه شامل محيط­هاي متعدد براي بهينه­سازي فرآيند شكل­دهي ورق، آناليز مرحله­اي فرآيند شكل­دهي، ايجاد بلنک اوليه و شبيه­سازي فرآيند شكل­دهي مي­باشد. براي اجراي شبيه­سازي فرآيند كشش عميق در نرم­افزار فرمينگ سوئيت، ابتدا مدل سه­بعدي قطعه در نرم­افزار ساليدوركس ترسيم شده و با استفاده از فرمت \*.step به نرم­افزار فرمينگ سوئيت منتقل گرديد. سپس پارامترهاي جنس ورق، ضخامت آن و ويژگي­هاي مكانيكي ورق اوليه شامل مقادير تنش نهايي، تنش تسليم و مدول الاستيسته به نرم­افزار معرفي گرديد. مراحل شبيه­سازي نرم­افزاري فرآيند كشش عميق در اين نرم­افزار با در نظر گرفتن فرضيات زير به انجام رسيد:

* هيچگونه جابجايي محوري در راستاي سنبه و ماتريس وجود ندارد.
* ابزارها کاملاً داراي تقارن محوري مي­باشد.
* رفتار ماده براي سنبه و ماتريس به صورت صلب است.
* ضريب اصطکاک در طول فرآيند ثابت در نظر گرفته مي­شود.

با انجام مراحل فوق براي حصول به نتايج مناسب، فرآيند مش­بندي ورق اوليه به صورت خودکار با وارد کردن اندازه و نوع المان مناسب انجام گرفت تا فرآيند شبيه­سازي كشش عميق قابل اجرا باشد. لازم به ذکر است که مقدار اصطکاک در حين شبيه­سازي با توجه به نوع روانکار مورد استفاده و تجربيات مشابه معادل 15/0 در نظر گرفته شده است.

با اتمام مراحل طراحي و شبيه­سازي در نرم­افزار و تأييد هندسه قالب جهت حصول به محصول با كيفيت موردنظر، فرآيند ماشينكاري قالب مورد استفاده براي كشش عميق ورق پوسته كاتاليست آغاز گرديد. براي ساخت قالب از فولاد اس- پي- كا گريد R و با سختی پنجاه و هفت راکول سي بعد از اجراي عمليات حرارتي استفاده شد. فرآيند ماشينكاري اجزاي قالب توسط دستگاه فرز سي- اِن- سی ساخت شرکت**Cincinati** مدل **VMC-1000** انجام گرفت. همچنين برای کاهش اصطکاک در حين كشش عميق كاربرد مداوم روغن معمولی برای روان­کاری ورق­گیر به كار گرفته شد. برای ایجاد قطعه­كار پوسته كاتاليست از پرس هيدروليكي با ظرفيت سيصد تن استفاده گردیده است.

3- نتايج

**3-1- فرآيند شبيه­سازي**

در اين بخش به بررسي نتايج به دست آمده از نرم­افزار فرمينگ سوئيت و شبيه­سازي فرآيند كشش عميق پوسته كاتاليست اگزوز پرداخته شده است. در شكل 1 مراحل شكل­دهي بلنك اوليه ورق بر حسب ميزان جابجايي سنبه طراحي شده در طول كورس قالب ارائه شده است.

|  |
| --- |
|  |
| الف  |
|  |
| ب  |
|  |
| ج |
|  |
| د  |
|  |
| ه |

**شكل 1** مراحل شکل دهی ورق فلزي بر حسب كورس طي شده توسط سنبه :الف) 20 درصد كورس، ب) 40 درصد كورس، ج) 70 درصد كورس، د) 90 درصد كورس و ه) 100 درصد طول كورس

 همانطور كه در شكل­ها نشان داده شده فرآيند كشش عميق قطعه موردنظر بدون رؤيت عيوبي نظير پارگي يا چروكيدگي در ورق فلزي به صورت پيوسته و با دقت موردنظر به انجام رسيده است. البته بايد توجه كرد كه نويسنده براي رسيدن به نتيجه مطلوب ناگزير از شبيه­سازي چندين باره فرآيند شكل­دهي، تعيين مقادير صحيح ورودي نظير نيروي ورق­گير و بهينه­سازي مستمر هندسه سه­بعدی سنبه بوده است.

يکي از قابليت­هاي مهم نرم­افزار فرمينگ سوئيت، امكان شبيه­سازي فرآيند با تعيين دقيق مقدار نيروي ورق­گير و بررسي تأثيرات مخرب انتخاب اشتباه آن در ايجاد چروكيدگي در كناره­هاي ورق فلزي در حين اجراي فرآيند كشش عميق مي­باشد. در شكل 2 مقايسه­اي از انتخاب دو مقدار متفاوت براي نيروي ورق­گير ارائه شده كه نشان مي­دهد در حالت استفاده از نيروي ورق­گير ده کيلو نيوتني اين نيروي کم سبب بروز چين­خوردگي شديد در نواحي آبي رنگ لبه­هاي ورق شده است. در حالي كه با انتخاب نيروي ورق­گير معادل سه مگا پاسگال قطعه بدون هيچ ايرادي در داخل قالب شكل داده می­شود.

در شکل 3 نيز قابليت نرم­افزار در تعيين ميزان درصد تغييرات ضخامت ورق بلنك اوليه در حين اجراي فرآيند کشش عميق نشان داده شده است. از نتايج اين تحليل مي­توان نواحي از ورق را که احتمال وقوع چين­خوردگی، پارگي و يا پديده گلويي­شدن در آنها محتمل است، شناسايي نموده و تغييرات لازم در قالب براي جلوگيري از اين پديده­ها را اعمال نمود. نويسنده با چندين بار شبيه­سازي فرآيند و بهينه­سازي مكرر هندسه سنبه و قالب با استفاده از اين ويژگي نرم­افزار موفق به اجراي شبيه­سازي نهايي مطابق با شكل 1 گرديده است. در سكل 4 مقادير تغيير ضخامت در بلنك اوليه با استفاده از نمودار طیف رنگي ارائه شده است.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| الف  | ب |

**شكل 2** اعمال مقادیر متفاوت نيروي ورق­گير: الف) نيروي كم ده كيلو نيوتوني، ب) نيروي مناسب سه مگا پاسكال



**شكل 3** طيف رنگي براي مشاهده مقادير تغيير در ضخامت ورق بعد از اجراي فرآيند كشش عميق

**3-1- فرآيند ساخت قالب**

بعد از شبيه­سازي و تحليل فرآيند کشش عميق به کمک نرم­افزار و تأييد نتايج به دست آمده از آن مرحله ساخت قالب­هاي مورد نياز آغاز گرديد. براي ساخت قالب­ها مجموعه­اي از عمليات­هاي اسپارک و فرزکاري بر روي بلوک­هاي تهيه شده از جنس فولاد اس- پي- كا انجام گرفت. براي فرزکاري قالب­ها از دستگاه فرز سي- اِن- سی نوع عمودی استفاده شد. شکل 4 نمايي از قالب کشش توليد شده را بعد از نصب بر روي پرس نشان مي­دهد. همچنين براي کاهش اصطکاک در حين اجراي فرآيند از روغن معمولي با نام 25w50 براي روان کاري با ضريب اصطكاك 15/0 استفاده گرديد.



**شکل 4** قالب ماشينكاري شده بعد از نصب بر روي پرس هيدروليک و قطعه­كار توليد شده در آن

با توجه به استفاده از ورق مستطيلي شكل براي توليد پوسته كاتاليست اگزوز، قطعه­كارهاي توليد شده در مرحله بعدي در داخل قالب برش قرار مي­گيرد تا گوشه­هاي ورق نيز به طور کامل از اطراف قطعه زدوده گردد. شکل 5 نمونه­اي از قطعه توليد شده بعد از برش گوشه­هاي ورق را در كنار قطعات خام توليد شده نشان مي­دهد. در شکل 6 نیز ابعاد نهایی پوسته کاتالیست بعد از پرسکاری نشان داده شده است.



**شکل 5** شکل نهايي پوسته کاتاليست انبارک اگزوز قبل و بعد از برش لبه­ها

مقايسه نتايج شبيه­سازي مدل سه­بعدي در محيط نرم­افزار با نمونه واقعي توليد شده از پوسته کاتاليست اگزوز، مطابقت قابل قبول ابعادي و هندسي در نحوه اجراي فرآيند را به اثبات مي­رساند طوري كه نمونه­هاي توليد شده بدون داشتن عيوبي نظير پارگي، چروكيدگي و كاهش بيش از حد ضخامت ورق در قسمت­هاي بحراني پوسته كاتاليست به درستي در مجموعه مونتاژي موردنظر نصب گرديد.

****

**شکل 6** ابعاد نهایی قطعه پوسته کاتالیست بعد از پرسکاری (میلیمتر)

از طرف ديگر تفاوت محسوسي بین مجموع تناژ اعمالی لازم براي شكل­دهي قطعه در محیط کارگاهی با تناژ پيش­بيني شده از پرس در محیط نرم­افزار دیده نشد. لازم به ذكر است كه ظرفيت پرس مورد استفاده برای شكل­دهي در محيط كارگاهي برابر با سيصد تن انتخاب گرديد كه در حين فرآيند شیر فشارشکن آن بر روی 160 تن تنظیم شده بود. همچنين تناژ خروجی استخراج شده برای کشش عمیق قطعه­كار با توجه به نمودار شكل 7 برابر با 149 تن تعيين گرديد.



**شکل 7** نمودار نيرو- تناژ پرس به دست آمده در حين شبيه­سازي فرآيند كشش عميق در نرم­افزار فرمينگ سوئيت

از دلايل انتخاب تناژ بالاتر از حد پيش­بيني نرم­افزار براي توليد نمونه واقعي، غلبه بر برگشت فنري ورق فولاد ضدزنگ 304L در قسمت نهايي طول کورس سنبه است تا بتوان با اعمال نيروي مازاد بر ورق از وقوع برگشت فنري در آن جلوگيري نمود. همچنين حجم توليد بالاي محصول سبب گرم شدن تدريجي روغن در پرس هيدروليک شده و موجب افت فشار مطلوب در پرس مي­گردد كه اين امر نيز موجب انتخاب ظرفيت پرس بيش از مقدار به دست آمده در شبيه­سازي شد. لازم به ذکر است که در قسمت انتهای کورس شکل­دهی ورق فلزی، فشار نهایی پرس به میزان بیست ثانیه بر روی قطعه حفظ گردید تا میزان برگشت فنری به کمترین میزان خود برسد.

4- نتيجه­گيري

در فرآيند کشش عميق پيش­بيني تجربي درصد کشش ورق، نيروي لازم براي اجراي فرآيند و تحليل و آناليز آن با در نظر گرفتن ميزان اصطکاک کار دشواري بوده و با خطاي فراوان همراه است. از طرف ديگر اجراي فرآيند کشش عميق بدون در نظر گرفتن پارامترهاي دخيل در آن مانند نيروي ورق­گير و طراحي هندسه صحيح سنبه و ماتريس به منظور اجتناب از عيوبي مانند چين­خوردگي و پارگي در ورق از اهميت بالايي برخوردار است. در اين تحقيق از نرم­افزار فرمينگ سوئيت براي پيش­بيني وضعيت کشش عميق ورق فولاد ضدزنگ 304L براي توليد پوسته کاتاليست انبارك اگزوز استفاده شد. ابتدا مدل سه­بعدي از پوسته كاتاليست در نرم­افزار طراحي ساليدوركس ترسيم شده و با انتقال به نرم­افزار فرمينگ سوئيت، تحليل­هاي موردنياز براي تعيين تناژ پرس، نيروي ورق­گير، توزيع کرنش روي ورق تغيير شکل يافته و ميزان تغيير در ضخامت ورق در حين فرآيند کشش عميق ورق انجام گرفت. با توجه به تحليل انجام شده، تغييرات موردنياز به صورت پيوسته بر روي مدل سه­بعدي سنبه و ماتريس انجام گرفته و با تأييد شبيه­سازي اجراي فرآيند كشش عميق در نرم­افزار، مرحله ماشينكاري و توليد قالب آغاز گرديد. نتايج به دست آمده از شبيه­سازي فرآيند و توليد نمونه واقعي نشان مي­دهد که نرم­افزار مورد استفاده قادر است با دقت بالايي ميزان نيروي لازم براي تعيين تناژ مناسب پرس و همچنين دقت ابعادي قطعه نهايي را تعيين نمايد. همچنين تمام عيوب احتمالي در مرحله شبيه­سازي شناسايي شده و قطعه توليد شده با توجه به شکل­هاي ارائه شده در مقاله بدون هيچ­گونه عيبي توليد گرديده است.

5- مراجع

[1] G. Sun, G. Li, Q. Li, Variable Fidelity Design Based Surrogate and Artificial Bee Colony Algorithm for Sheet Metal Forming Process, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 59, No.1, pp. 76-90, 2012.

[2] S.K. [Panthi](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909004452), N. [Ramakrishnan](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909004452), M. [Ahmed](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909004452), S.S. [Singh](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909004452), M.D. [Goel](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909004452), Finite Element Analysis of Sheet Metal Bending Process to Predict the Spring Back, *Material and Design*, Vol.31, No.2, pp.657-662, 2010.

­­­

[3] T. Clausmeyer, A. Güner, A.E. Tekkaya, V. Levkovitch, B. Svendsen, Modeling and Finite Element Simulation of Loading-Path-Dependent Hardening in Sheet Metals During Forming, [*International Journal of Plasticity*](http://www.sciencedirect.com/science/journal/07496419), [Vol. 63](http://www.sciencedirect.com/science/journal/07496419/63/supp/C), No.2, pp. 64–93, 2014.

[4] E.L. Odenberger, M. Oldenburg, P. Thilderkvist, T. Stoehr, J. Lechler, M. Merklein, Tool Development Based on Modeling and Simulation of Hot Sheet Metal Forming Of Ti–6Al–4V Titanium Alloy, [*Journal of Materials Processing Technology*](http://www.sciencedirect.com/science/journal/09240136), Vol.211, No.8, pp.1324-1335, 2011.

[5] M. Tisza, Numerical modelling and simulation in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.151, No. 1-3, pp. 58-62, 2004.

 [6] M.S. Shunmugam, M. Kanthababu, *Advances in Simulation, Product Design and Development: Proceedings of AIMTDR 2018*, pp. 30-49, Springer Nature, 2019.

[7] N. Kishor, D. Ravi Kumar, Optimization of Initial Blank Shape to Minimize Earing in Deep Drawing Using Finite Element Method, [*Journal of Materials Processing Technology*](http://www.sciencedirect.com/science/journal/09240136), Vol.[130-131](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&_hubEid=1-s2.0-S0924013600X01823&_cid=271356&_pubType=JL&view=c&_auth=y&_acct=C000228598&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=8b280c97c60da2dcad1eb12833876935), No.1, pp.20-30, 2002.

[8] G. Gantar, K. Kuzman, B. Filipič, Increasing the Stability of the Deep Drawing Process by Simulation-Based Optimization, [*Journal of Materials Processing Technology*](http://www.sciencedirect.com/science/journal/09240136), Vol.[164-165](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&_hubEid=1-s2.0-S0924013605X01285&_cid=271356&_pubType=JL&view=c&_auth=y&_acct=C000228598&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=c99eeeb45ca9fc066390119b2ba72e38), No.1, pp.1343-1350, 2005.

[9] D. Banabic, Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation, pp. 32-45, Berlin: Springer Science & Business Media, 2010.

[10] M.C. Oliveira, J.V. Fernandes, J.V., *Modelling and simulation of sheet metal forming processes*, pp. 110-115, New York: mdpi publication, 2019.

[11] B. Haddag, T. Balan, F. Abed-Meraim, Investigation of Advanced Strain-Path Dependent Material Models for Sheet Metal Forming Simulations, [*International Journal of Plasticity*](http://www.sciencedirect.com/science/journal/07496419), Vol .23, No.1, pp. 951-979, 2007.

[12] K. Hariharan, C. Balaji, Material Optimization: A Case Study Using Sheet Metal Forming Analysis, [*Journal of Materials Processing Technology*](http://www.sciencedirect.com/science/journal/09240136), Vol.209, No.1, pp.324-331, 2009.

1. Auto form [↑](#footnote-ref-1)
2. Hyper form fast [↑](#footnote-ref-2)
3. Open form [↑](#footnote-ref-3)
4. Dynaform [↑](#footnote-ref-4)
5. Abaqus [↑](#footnote-ref-5)
6. Forming suite [↑](#footnote-ref-6)