



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مکانیک

بررسی چروکیدگی ورقهای آلومینیومی در فرآیند کشش عمیق

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک-ساخت و تولید

محمد رضا فوده

استاد راهنما

دکتر ناصر نهضت

چکیده:

کشش عمیق از مهمترین فرآیندهای شکل دادن ورق است که به طور وسیعی در صنعت برای تغییر شکل ورق‌های فلزی و تبدیل آن‌ها به قطعات توخالی و بدون درز به کار می‌رود. این فرآیند کاربردی وسیع در تولید قطعاتی با شکل‌های متنوع و ابعاد مختلف برای عرصه‌های مختلف تولیدی دارد که در برگیرنده قطعات بسیار کوچک و مورد نیاز در صنایع برق و الکترونیک تا ابعاد چند متری در شاخه‌های دیگر صنعت می‌باشد. گسترش روشهای ویژه در فرآیند کشش عمیق موجب توسعه در زمینه‌هایی نظیر صنایع هواپیماسازی و خودروسازی نیز شده است.

چروکیدگی (wrinkling) یکی از عیوب عمده در فرآیند کشش عمیق محسوب می‌شود و مشکلی است که اغلب در فرآیند کشش عمیق با آن مواجه هستیم، این عیب می‌تواند موجب آسیب دیدگی قالب و تأثیر نامطلوب بر روی قطعه و عملکرد آن شود، بنابراین پیش‌بینی و جلوگیری از چروکیدگی بسیار مهم می‌باشد.

در این پروژه سعی شده است تا تأثیر پارامترهای مختلف بر پدیده چروکیدگی ظرف مربعی شکل در فرآیند کشش عمیق مورد بررسی قرار گیرد.

جنس ماده مورد استفاده آلومینیم بوده و بلانک مورد استفاده دایره‌ای می‌باشد. کلیه شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار ABAQUS/EXPLICIT v6.7 انجام شده است و تأثیر آلیاژهای مختلف آلومینیوم، شعاع سر سنبه، شعاع لبه ماتریس، نیروی ورق گیر، فاصله ثابت بین ماتریس و ورقگیر و ضریب اصطکاک بر پدیده چروکیدگی بررسی شده است. نتایج بدست آمده حاکی از این مطلب است که با افزایش نیروی ورقگیر، افزایش ضریب اصطکاک، کاهش فاصله بین ورق و ورقگیر، کاهش شعاع سر سنبه و شعاع لبه ماتریس می‌توان چروکیدگی را در فرآیند کشش عمیق کاهش داد. همچنین نتایج بدست آمده با نتایج تجربی موجود بررسی و مقایسه گردیده است.

کلمات کلیدی:

شکل دهی، کشش عمیق، چروکیدگی، آلیاژهای آلومینیوم، نرم افزار ABAQUS

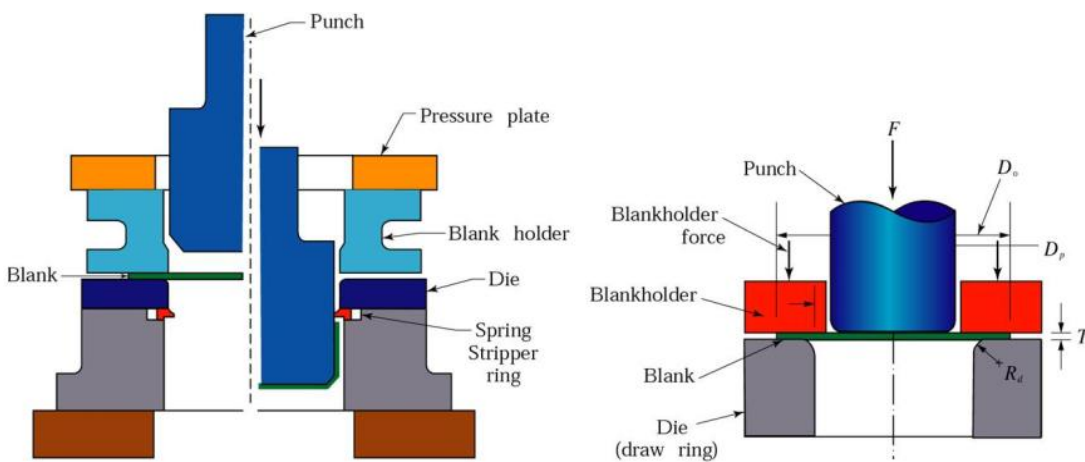
فصل اول

مقدمه

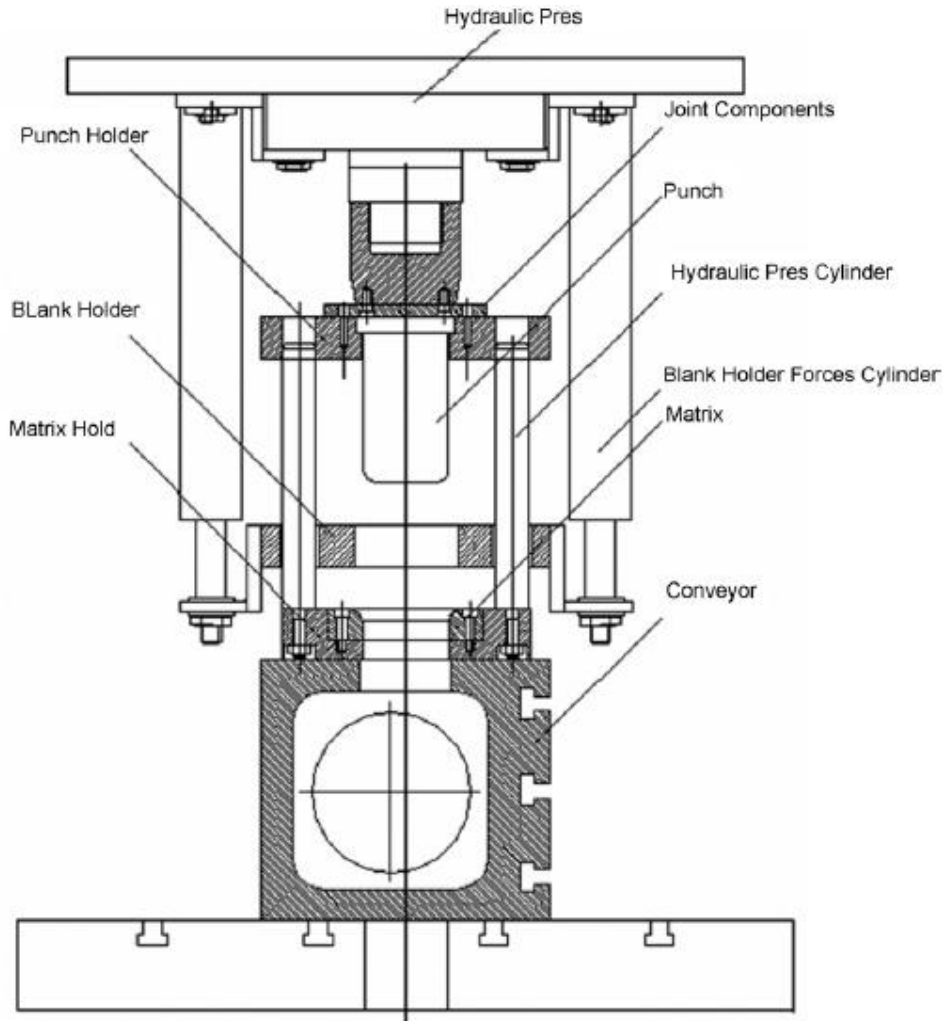
1-1 مقدمه

در فرآیند کشش عمیق ورق تخت که به آن blank گفته می‌شود توسط سنبه (punch) به سمت حفره ماتریس (Die) هدایت می‌شود و جریان فلزی سه بعدی در ورق پدید می‌آید. نیروی سنبه توسط پرس‌های مکانیکی یا هیدرولیکی تأمین می‌شود.

در شکل 1-1 نمایی از فرآیند کشش عمیق و اجزاء تشکیل دهنده آن و در شکل 2-1 دستگاه پرس هیدرولیکی که برای انجام فرآیند کشش عمیق از آن استفاده می‌شود و به وسیله کامپیوتر کنترل می‌شود، نشان داده شده است.



شکل 1-1 فرآیند کشش عمیق



شکل 2-1 دستگاه فرآیند کشش عمیق (karali, 2005)

2-1 اهمیت و بررسی چروکیدگی ورق با استفاده از روش اجزاء محدود

چروکیدگی یکی از مهمترین عیوب به وجود آمده در فرآیند کشش عمیق می‌باشد و مشکلی است که اغلب در فرآیند کشش عمیق با آن مواجه هستیم، به عنوان مثال در خودروسازی ۸۰٪ قطعات معیوب چروکیده هستند در حالی که ۲۰٪ باقی مانده ناشی از پارگی و مشکلات دیگر می‌باشند. [۱]

روش‌های تجربی در بیان دقیق جزئیات فرآیندهای تغییر شکل و رفتارهای آن‌ها ضعیف بود و اطلاعات مربوط به آن‌ها تجدیدنپذیراند. اگرچه تئوری پلاستیسیته کلاسیک - تئوری میدان خط لغزش^۱ - روش‌هایی مانند روش حد بالایی^۲ و حد پایینی^۳ در جهت فهم و بررسی فرآیندهای تغییر شکل فلزات کمک زیادی می‌کنند. با این وجود

^۱ - Slip-line Field Theory

^۲ - The Upper Bound Method

^۳ - The lower Bound Method

محدودیت‌های آن‌ها باعث کاربردشان در حالت‌های خاص می‌شود، تحلیل‌های عددی نیز روش دیگری برای بررسی این فرآیندهای نسبتاً پیچیده فلزات محسوب می‌شوند.

روش‌های عددی در حل معادلات دیفرانسیل حاکم به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند:

۱- روش تفاضل محدود^۱

۲- روش المان محدود^۲

از آنجا که روش اختلاف محدود در تحلیل مسائل غیرخطی محدودیت دارد و در مسائل ساده کاربرد دارد، روش اجزاء محدود به عنوان قدرتمندترین روش عددی برای تحلیل فرآیندهای تغییر شکل فلزات شناخته شده است. این روش برای تحلیل فرآیندهای تغییر شکلی مانند اکستروژن^۳، آهن‌گری^۴، کشش عمیق^۵، نورد^۶ و غیره کاربرد فراوانی دارد.

با استفاده از روش اجزاء محدود می‌توان اندازه تغییر شکل‌ها، چگونگی جریان فلز، تنش‌ها، کرنش‌ها، بارهای خارجی، چروکیدگی ورق و اطلاعات مفید دیگری را برای فرآیندهای تغییر شکل بدست آورد.

از سال ۱۹۶۰ که روش اجزاء محدود متولد شد، تاکنون نرم‌افزارهای متعددی برای استفاده از این روش طراحی و به بازار آمده‌اند. از آنجا که بازار نرم‌افزارهای صنعتی کاملاً رقابتی است، تقریباً تمام نرم‌افزارهای اجزاء محدود موجود از قابلیت‌های بسیار خوبی برخوردار هستند. در این میان ABAQUS بسیاری از نقاط ضعف و اشکالات نرم‌افزارهای اجزاء محدود دیگر را ندارد و سهولت در استفاده، مدل‌سازی قوی، تحلیل دقیق و سرعت بالای این نرم‌افزار، آن را به یک نرم‌افزار اجزاء محدود ممتاز تبدیل کرده است.

از جمله مواردی که به خوبی می‌توان توسط نرم‌افزار ABAQUS بررسی کرد، فرآیند کشش عمیق و چروکیدگی ورق در این فرآیند است، تا بتوان به کمک آن قطعات سالم و بدون عیبی بدست آورد و از تلف شدن انرژی و زمان و هزینه‌های زیادی که در اثر ساخت تجربی محصولات بدست می‌آید، جلوگیری کرد.

3-1- تاریخچه فعالیت‌های انجام شده در زمینه کشش عمیق

در سال ۱۹۹۰ وگل و لی [۲] یک روش جهت محاسبه توزیع کرنش در قطعات کشش عمیق ارائه نموده‌اند. روش آن‌ها براساس تئوری تنش صفحه‌ای می‌باشد، به طوری که از تنش قائم و برشی و تغییر ضخامت ورق صرف‌نظر شده است. در محاسبات انجام شده ضریب سخت‌شوندگی و غیرهمگنی قائم در نظر گرفته شده‌اند و مدل‌سازی فرآیند توسط یک برنامه رایانه‌ای برای استوانه‌های دایره‌ای و منشورهای مربعی و مستطیلی صورت گرفته است، شبیه‌سازی انجام شده تنها به آنالیز ورق در حال کشش و محاسبه توزیع کرنش‌ها در ناحیه فلانج پرداخته و عوامل مؤثر بر پارگی در ناحیه گلویی و چروکیدگی ورق در ناحیه فلانج را مورد بررسی قرار می‌دهد. کرنش‌های محاسبه شده با این روش با نتایج تجربی نیز مقایسه شده و نتایج خوبی نیز داشته‌اند برنامه نوشته شده مدت زمان بسیار کمی را

¹ - Finite difference Method

² - Finite element Method

³ - Extrusion

⁴ - forge

⁵ - Deep Drawing

⁶ - Rolling

جهت آنالیز صرف نموده و توانمندی خود را در آنالیز بسیاری از اشکال و قطعات صنعتی نشان داده است. همچنین تأثیر اصطکاک و نیروی ورقگیر به نحوی کشیده شدن ورق مورد بررسی قرار گرفته است و محل پارگی و توزیع کرنش با نتایج تجربی تطابق کامل داشته است.

در سال ۱۹۹۱ یانگ و لی [۳] با استفاده از روش انرژی و تقسیم قطعه به نواحی مختلف و مش بندی هر ناحیه به طور ویژه به بررسی و آنالیز فرآیند کشش عمیق ورق پرداخته‌اند. راه حل ارائه شده سعی نموده تا با بهینه نمودن بسیاری از پارامترهای مورد نظر در چنین فرآیندهایی به جواب‌های با دقت بالاتر دست یابد. شبیه‌سازی انجام شده بر روی فرآیند اتساع ورق با سنبه‌های نیم کره‌ای و استوانه‌ای بوده و نتایج حاصل با نتایج تجربی مطابقت داشته است. ورق مورد نظر دارای غیرهمگنی بوده، و اثر اصطکاک و شرایط تماسی نیز در نظر گرفته شده است.

در سال ۱۹۹۲ سوخومولینو و همکارانش [۴] یک روش محاسباتی برای تحلیل فرآیند شکل‌دهی متقارن ورق‌های فلزی مانند کشش توسط سنبه و کشش عمیق بیان کرده‌اند، روش استفاده شده توسط آن‌ها اجزاء محدود می‌باشد که براساس تئوری جریان مربوط به معیار تسلیم هیل برای ورق‌های همگن و تئوری غشائی پوسته‌ها پایه‌گذاری شده است. برای مدل‌سازی اصطکاک از قانون اصطکاک کولمب استفاده کرده و اثرات غیرخطی ناشی از تغییرات هندسه ورق را به صورت یک روال تکرار، اعمال نموده‌اند.

در سال ۱۹۹۳ یانگ و لی [۵] در مقاله‌ای یک روش سیستماتیک نتیجه شده از روش انرژی جهت شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق اشکال منشوری غیردایره‌ای ارائه نمودند. در روش پیشنهاد شده ناحیه تغییر شکل یافته به نواحی متعددی تقسیم شده و هر ناحیه از لحاظ هندسی و شرایط تماس به طور مجزا مش بندی و مدل شده است. در روش مدل‌سازی میدان‌های سرعت برای هر ناحیه تعریف شده است و شرایط تماسی نیز در نظر گرفته شده است، در این فرآیند اثر اصطکاک در فرآیند کشش عمیق ورق نیز مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل از این آنالیز با نتایج تجربی تطابق داشته است.

در سال ۱۹۹۴ وانگ، کینزل و آلتان [۶] چروکیدگی را برای ماده ایزوتروپ الاستیک و آنایزوتروپ پلاستیک همراه اعوجاج در ناحیه غیرتماس با قالب بررسی نمودند. این تحقیق در مورد ورق کم ضخامت با استفاده از تئوری بایفرکیشن و معیار هیل در ماده الاستیک - پلاستیک برای توصیف چروکیدگی انجام شده است، در این تحقیق کرنش سختی و آنایزوتروپیک در نظر گرفته شده است.

در سال ۲۰۰۰ کیم، یانگ، یون و بارلت [۷] نشان دادند که رفتار چروکیدگی ورق نازک بدون نقص هندسی مربوط به ناپایداری فشاری ماده می‌باشد که ناپایداری فشاری از فاکتورهای زیادی نظیر موقعیت تنش، خواص مکانیکی ورق فلزی، هندسه بدنه، شرایط تماس و آنایزوتروپی پلاستیک تأثیر می‌پذیرد. آن‌ها بیان داشتند که چون بررسی ناپایداری فشاری در تغییر شکل پلاستیک بسیار مشکل است به علت اینکه اثر فاکتورها خیلی پیچیده و رفتار ناپایداری ممکن است به شکل‌های مختلفی نشان داده شود. روش مورد استفاده آن‌ها تئوری بایفرکیشن برای حل اجزاء محدود چروکیدگی اولیه و رشد آن برای ورق نازک بدون عیب بررسی شد که همه پارامترهای مذکور در حل اجزاء محدود به سادگی منظور شدند. حل اجزاء محدود برای ماده آنایزوتروپیک انجام شد و برای بررسی اثر آنایزوتروپی پلاستیک بر روی ناپایداری پلاستیک یک ورق مربعی که تحت فشار در یک جهت و تحت کشش در جهت دیگر است. با اجزاء محدود مورد تحلیل قرار گرفت.

در سال ۲۰۰۰ ونگ و کائو [۸] نیز با بهره‌گیری از بقای انرژی و تئوری خمش پلاستیک تحلیل پارگی و چین خوردگی را برای ورق‌های مربعی انجام داده‌اند. آن‌ها فلنج را به عنوان ورقی مدل کرده‌اند که تحت شرایط بارگذاری در صفحه و عرضی^۱ قرار داده‌اند. آن‌ها همچنین فرض کرده‌اند که در طی فرآیند ضخامت ثابت سپس توانسته‌اند نیروی ورقگیر بهینه را به صورت تحلیلی محاسبه کنند.

در سال ۲۰۰۱ کیم، یون، یانگ و بارلت [۹] تحقیق بر روی وقوع چروکیدگی در ظروف بیضوی شکل کشیده شده و فرآیند کشش عمیق انجام دادند. آن‌ها بیان داشتند که آغاز و رشد و نمو چروکیدگی در فرآیندهای شکل‌دهی ورق به وسیله‌ی عواملی همچون تنش، خواص ماده ورق فلزی، شکل هندسی بلاتک و شرایط تماسی تأثیر می‌پذیرد و آنالیز چروکیدگی با لحاظ همه این عوامل مشکل است، به خاطر اینکه تأثیر این عوامل خیلی پیچیده است و رفتار چروکیدگی ممکن است برای یک تغییر کوچک در این فاکتورها تغییر زیادی از خود نشان دهد. لذا در این تحقیق از تئوری بایفرکیشن برای آنالیز المان محدود چروکیدگی استفاده می‌شود. در این تحقیق تأثیر نسبت قطرهای سنبه روی چروکیدگی در کشش عمیق ظروف بیضوی بررسی شده است.

در سال ۲۰۰۱ همتیان و ویلد [۱۰] تأثیر نقص ابزار را روی شروع و وقوع چروکیدگی در فرآیند کشش عمیق مورد بررسی قرار دادند. روش استفاده مدل المان محدود می‌باشد که برای تحقیق درباره‌ی اثر انرژی اولیه بر روی شروع چروکیدگی و در مورد ورق ضخیم استفاده شده است. در تحقیق آن‌ها دو نوع نقص ابزار یکی انحراف سینه و دیگری کج بودن بلاتک در نظر گرفته شد، نتایج شبیه‌سازی تأکید می‌کند که انحراف سنبه بر روی رفتار چروکیدگی مهم است.

در سال ۲۰۰۱ چو و ایکسو [۱] مسأله چروکیدگی ورق را در فرآیند کشش عمیق ظروف فنجان‌ی الاستیک - پلاستیک بیفرکیشن تحلیل کردند. آن‌ها فلنج را به گونه‌ای مدل کردند که کشش شعاعی در لبه داخلی ایجاد شده است. آن‌ها بیان کردند که آلیاژهای آلومینیوم در محدوده‌ی پلاستیک چروک می‌خورند و تنش بحرانی را برای شروع چروکیدگی محاسبه کردند.

در سال ۲۰۰۲ کوریا و فرون [۱۱] وقوع چروکیدگی در ورق‌های فلزی را با الاستیک پلاستیک بایفرکیشن برای ورق‌های نازک با انحناى مرکب مورد بحث دادند.

شبیه‌سازی را از المان محدود برای ظروف مخروطی با استفاده از Abaqus / Explicit انجام دادند. نتایج المان محدود برای وقوع چروکیدگی در دیواره‌ی ظرف با پیش‌بینی مدل بایفرکیشن انجام دادند. همچنین آن‌ها خاصیت ذاتی آنایزوتروپیک بر روی تمایل چروکیدگی را بررسی کردند و نشان دادند که حصول شرایط بحرانی چروکیدگی به صورت مهمی به وسیله‌ی موقعیت تنش و انحناى ورق تأثیر می‌پذیرد.

در سال ۲۰۰۳، کوریا، فرون و موریا [۱۲] یک آنالیز از وقوع چروکیدگی برای خم کردن مضاعف با استفاده از المان الاستیک پلاستیک پوسته‌ای برای بارگذاری تنش صفحه‌ای دو محوره بیان کردند. آن‌ها تسلیم پلاستیک معیاری که اخیراً برای ورق‌های آنایزوتروپیک بیان شده را شرح می‌دهند. شبیه‌سازی اجزاء محدود یک کشش عمیق تجربی را با استفاده از نرم‌افزار Abaqus / Explicit با هدف مقایسه نتایج المان محدود با نتایج تجربی انجام دادند.

¹ - Lateral

در سال ۲۰۰۳ کولگان و موناگهان [۱۳] مهمترین فاکتورها را در فرآیند کشش عمیق با کمک تحلیل نتایج تجربی و آماری تعیین کردند که بیان داشتند پارامترهای مختلف شامل شعاع سنبه و ماتریس سرعت سنبه، نیروی گیره‌بندی، اصطکاک و عمق کشش می‌باشد. آن‌ها بیان کردند که شعاع سنبه و ماتریس و بزرگترین تأثیر را بر روی ضخامت فنجان‌های تغییر شکل یافته دارند. در مقایسه با نیروی ورق‌گیر و اصطکاک و هر چه شعاع سنبه کمتر باشد نیروی سنبه بیشتر و کشش نهایی کمتر است. همچنین بر طبق نظر آن‌ها اگر نیروی ورق‌گیر در بین حد بالا و حد پایین معقولی قرار نگیرد بر فرآیند کشش تأثیر می‌گذارد و اگر نیروی ورق‌گیر زیاد باشد گسیختگی رخ داده و اگر کم باشد چروکیدگی اتفاق می‌افتد و برای از بین بردن آنایزوتروپی ورق‌ها از فرآیند آنبیل ورق فلزی استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۴ کوریا و فرون [۱۴] تحقیقاتی با استفاده از حل تحلیلی و عددی و اجزاء محدود برای چروکیدگی انجام دادند، در هر دو سیستم حل معیار تسلیم فرون برای حالت ارتروپیک استفاده شده است. حل تحلیل براساس معیار بیفورکیشن و کمانش پلاستیک برای ورق‌های کم‌ضخامت انجام شده است و حل عددی با نرم‌افزار / Abaqus Explicit انجام شده است. هر دو آنالیز عددی (FEM) و تحلیلی با بایفرکیشن تطابق مناسبی دارند.

در سال ۲۰۰۷ گاواس و ایزسیلر [۱۵] تأثیر فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر (BHG) را در حالتی که ورق‌گیر ثابت باشد در ورق‌های آلومینیومی، بر روی ضخامت ورق و نیروی سنبه به دست آورده‌اند. در این بررسی بلانک دایره‌ای شکل با ضخامت ۱ میلی‌متر به وسیله سنبه‌ای مربعی شکل وارد ماتریس شده و شکل سنبه را به خود می‌گیرد. آن‌ها بیان داشتند که افزایش BHG تأثیر چندانی بر روی نیروی سنبه و توزیع ضخامت ندارد ولی بر روی چروکیدگی تأثیر مستقیم می‌گذارد، به طوری که در BHG‌های مساوی ۱ تا ۱/۳ ضربدر ضخامت ورق، قطعات سالم و بدون چروکی تولید می‌شوند ولی از ۱/۳ mm ضربدر ضخامت ورق به بعد چروک‌ها ظاهر شده به طوری که $BHG = 1/8$ به بالا در اثر چروکیدگی زیاد و پیچش بیش از حد ورق در گوشه‌های بالای ظرف پاره می‌شود.

در سال ۲۰۰۷ اگراوال و همکارانش [۱۶] با برابر قرار دادن انرژی لازم برای چین خوردگی با انرژی لازم برای جلوگیری از آن کمترین نیروی لازم برای ورق‌گیر را به دست آورده‌اند. گروه اخیر همچنین با یک تحلیل حد بالایی تغییر ضخامت را به دست آورده‌اند.

در سال ۲۰۰۸، دمیرسی، اسز و مصطفی یسار [۱۷] تأثیر نیروی ورق‌گیر را بر روی ظروف مربعی شکل، در حالت تجربی و تئوری بررسی کردند. ورق مورد استفاده دایره‌ای به ضخامت ۲ mm و از جنس آلومینیوم می‌باشد. بررسی عددی به وسیله نرم‌افزار Lis-Dyna می‌باشد که نتایج به دست آمده با نتایج تجربی ۸۵٪ تطابق دارند.

¹ - Blank Holder Gap

4-1 محتوای فصل های بعدی

در فصل دوم، فرآیند کشش عمیق، جریان فلز در این فرآیند و پارامترهای مؤثر بر آن به طور کامل، بیان شده است. همچنین در رابطه با بدست آوردن شکل بلانک مناسب و محاسبات مربوطه و نیز محاسبات مربوط به نیروهای کشش که شامل نیروی سنبه و نیروی ورقگیر می باشد، مطالبی ذکر شده است.

در فصل سوم، چروکیدگی ورق در فرآیند کشش عمیق و عوامل مؤثر بر آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در فصل چهارم، در رابطه با آلومینیوم و نحوه ی طبقه بندی آلیاژهای آن و همچنین خواص و کاربردهای صنعتی آلومینیوم به ویژه در فرآیند کشش عمیق شرح داده شده است.

در فصل پنجم، نمودارهای حد شکل دهی و نحوه ی بدست آوردن آنها بیان شده است، همچنین مناطق مختلف نمودار بخصوص منطقه ای که در آن چروکیدگی ورق اتفاق می افتد، نشان داده شده است.

در فصل ششم، ابتدا در مورد نرم افزار ABAQUS و آشنایی کلی با آن مطالبی ذکر شده است سپس روند مدل سازی فرآیند کشش عمیق در آن در هر مدول به صورت مجزا بیان شده است.

در فصل هفتم نتایج عمیق بر چروکیدگی ظروف مربعی که از نرم افزار ABAQUS بدست آمده، ارائه شده است. همچنین نتایج به دست آمده با نتایج تجربی موجود بررسی و مقایسه گردیده، پارامترهای مؤثر در جلوگیری از چروکیدگی ورق و بهبود فرآیند کشش عمیق ارائه گردیده است.

در نهایت پیشنهاداتی برای ادامه کارهای آینده در ارتباط با فرآیند کشش عمیق، داده شده است.

فصل دوم

کشش عمیق

2-1 مقدمه

کشش عمیق یک فرآیند کار سرد است که طی آن یک بلانک فلزی مسطح و از پیش بریده شده، بدون هیچ گونه چروک، نازک شدگی یا شکست اضافی به داخل حفره‌ای توخالی کشیده می‌شود. اشکال مختلفی از ظروف که با این شیوه شکل دهی حاصل می‌شوند ممکن است استوانه‌ای، قوطی شکل همراه با دیواره‌های صاف یا مخروطی، یا همراه با ترکیبی از هر دو نوع دیواره باشند. [۱۸] گسترش روشهای ویژه در فرآیند کشش عمیق موجب توسعه فنی زمینه‌هایی نظیر صنایع هواپیما و خودروسازی شده است همچنین شامل کاربردی وسیع در زمینه تولید قطعاتی با شکلهای متنوع و ابعاد مختلف برای دیگر عرصه‌های تولیدی بوده این محدوده در برگیرنده قطعات بسیار کوچک و مورد نیاز در صنایع برق و الکترونیک تا ابعاد چند متری در شاخه‌های دیگر صنعت میباشد .

علت کاربرد فراوان این فرآیند را می‌توان در کورس سریع پرس یا سرعت تولید بالا نسبت به روشهای تولیدی دیگر، قابلیت تولید قطعات هندسی با محور متقارن یا قطعات هندسی نامتقارن با تعداد عملیات محدود، دقت ابعادی دقیقتر نسبت به روشهایی مانند ریخته‌گری و نورد و استفاده از نیروی کار غیر ماهر و هزینه‌های اقتصادی موجه‌تر دانست. ویژگی بارز عملکردی فرآیند کشش عمیق را میتوان در تولید قطعاتی با استحکام بالا و وزن کم یافت، همچنین تولید قطعات هندسی که به کمک برخی از فرآیندهای ساخت نمیتوان آنها را تولید کرد با این روش امکان پذیر است.

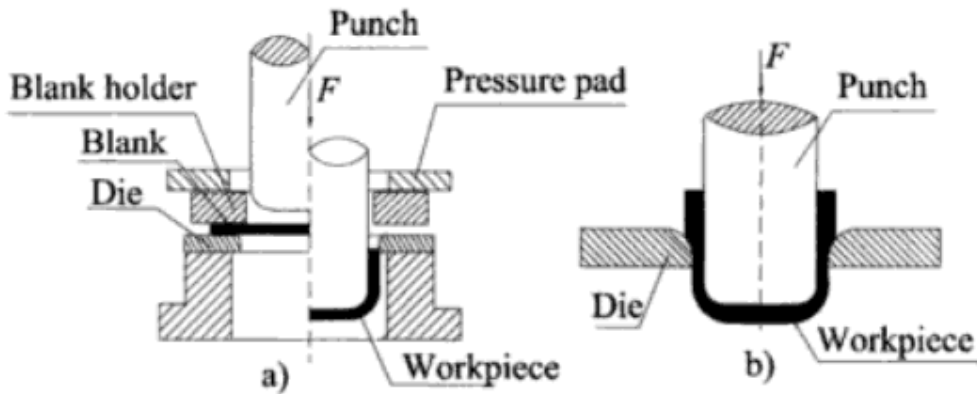
از تولیدات متداول کشش عمیق میتوان به ظروف با اشکال مختلف مورد استفاده در پزشکی، تشتک کولر، کپسولهای گاز و CNG، قوطیهای آشامیدنی، ظروف نگهداری مواد غذایی، ظرفشوییها، باک بنزین، مخزن روغن خودرو، ظروف مورد استفاده در صنایع نظامی و مهمات سازی، پوکه فشنگ و ... را نام برد.

فرآیند کشش عمیق را میتوان به دو دسته تقسیم بندی کرد:

۱- فرآیند کشش عمیق بدون کاهش ضخامت قطعه کار (کشش خالص)

۲- فرآیند کشش عمیق با کاهش ضخامت قطعه کار (توکاری) [۱۹]

شکل ۱-۲ نمایی از فرآیند کشش عمیق را نشان میدهد که در آن ورق تخت توسط سنبه به سمت حفره ماتریس هدایت میشود و جریان فلزی به شکل سه بعدی در ورق بوجود می آید.

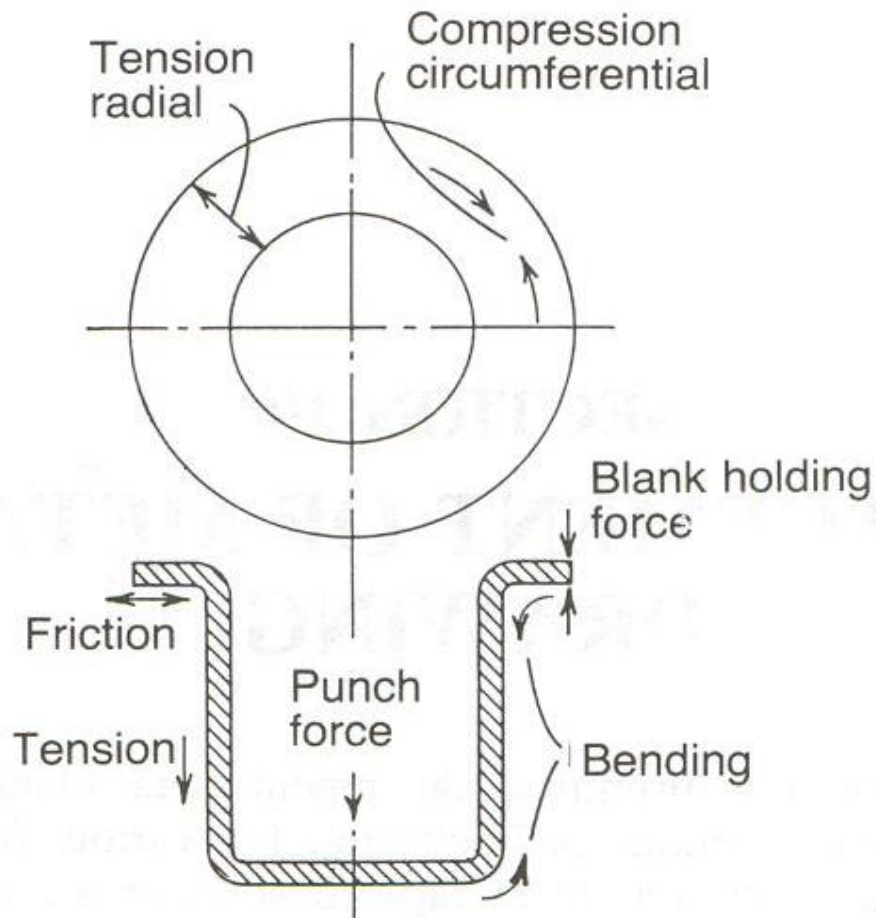


شکل 1-2 نمایی از فرآیند کشش عمیق (a) کشش خالص (b) توکاری [19]

2-2 جریان فلز در فرآیند کشش عمیق :

1-2-2 ظروف استوانه‌ای :

وقتی که سنبه به بخشی از فلز بلانک در راستای حفره قالب نیرو وارد می کند، نیروهای متفاوتی وارد عمل می - شوند و یک جریان پیچیده پلاستیک از فلز را به وجود می آورد. در این فرآیند حجم و ضخامت فلز ثابت باقی مانده و شکل نهایی ظرف شبیه به کانتور سنبه در می آید. (شکل ۲-۲)



شکل 2-2 نیروهای وارده به جریان فلز در حین کشش [18]

در فرآیند کشش عمیق نه تنها نواحی بزرگی در معرض تغییر شکل قرار می گیرند بلکه تنش پدید آمده در نواحی مختلف متفاوت بوده، بطور کلی می توان سه ناحیه که در معرض تنشهای مختلف قرار می گیرند را مورد بررسی قرار داد:

۱- بخش مسطح بلانک که هنوز وارد حفره قالب نشده است (فلنج).

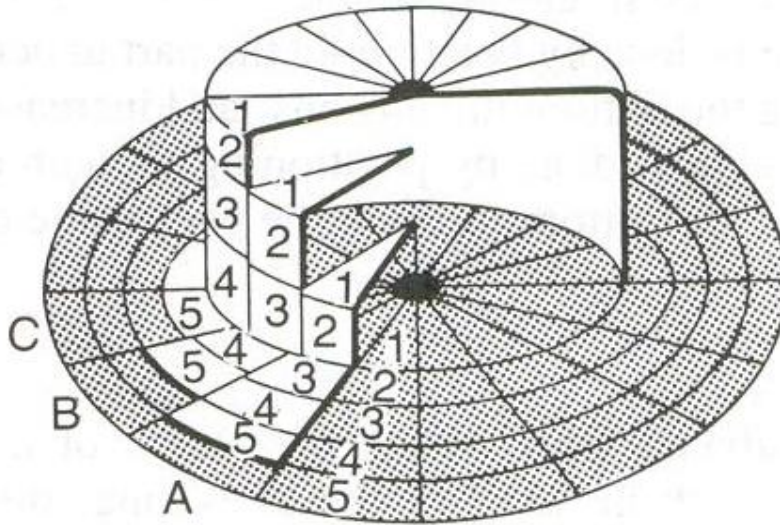
۲- بخشی از بلانک که در فرآیند شرکت کرده و وارد حفره قالب می شود (دیواره).

۳- ناحیه ای از بلانک که در تماس مستقیم با سنبه می باشد (کف ظرف).

تنش کششی شعاعی ناشی از کشیدن بلانک به درون حفره ماتریس است. علاوه بر این، تنش فشاری که عمود بر بلانک اعمال میشود در اثر نیروی فشاری ورقگیر پدید می آید.

در این میان سنبه موجب انتقال نیروی F به کف فنجان میشود و نیرو به دیواره ها و سپس به ناحیه فلنجی انتقال می یابد. در این شرایط دیواره تمایل دارد در جهت طولی افزایش طول دهد که موجب نازک شدن دیواره میشود و ممکن است قطعه کار در معرض پارگی قرار گیرد. [۱۹]

در شکل ۲-۳ مراحل ساخت ظرف به طور شماتیک نشان داده شده است. پس از یک ضربه کوچک از طرف سنبه، مرحله A از ساخت ظرف مورد نظر آغاز می شود و المان حجمی ۲ در بلانک خم می شود و به دور سنبه کشیده می شود. همزمان قسمتهای خارجی بلانک که به قسمتهای ۳ و ۴ و ۵ در شکل مشخص هستند به صورت شعاعی به سمت مرکز بلانک حرکت می کنند و این عمل در مراحل B, C نشان داده شده است. المانهای حجمی مختلف از بعد محیطی کاهش طول و متعاقب آن از بعد شعاعی افزایش طول می دهند، تا این که به حفره ماتریس برسند. سپس روی لبه حفره ماتریس خم می شوند و به شکل لبه ماتریس در می آیند. این المانها پس از تبدیل شدن به بخشی از دیواره ظرف به شکل مستقیم و صاف در می آیند. بعنوان مثال همانطور که در شکل ۲-۳ می بینیم سطح ۱ در حین کشش در کف ظرف بدون تغییر باقی مانده و سطوح ۲ و ۳ و ۴ که بخشی از دیواره ظرف را شکل می دهند، از حالت زاویه دار به شکل طویل و موازی در دیواره ها تغییر شکل می دهند. چنین حالتی در حین ورود این سطوح از لبه ماتریس به داخل حفره ماتریس اتفاق می افتد. از این منظر جریان فلز بیشتری اتفاق نمی افتد.



شکل 2-3 مرحله به مرحله جریان فلز [18]

به طور کلی جریان فلز در فرآیند ساخت ظرف به صورت زیر خلاصه می شود:

۱- از ابتدا در سطوحی که کف ظرف را تشکیل می دهند، در بلانک و در حین کشش تغییر شکل صورت نمی گیرد. این مسأله با ثابت نشان دادن فاصله بین خطوط مشخص و با توجه به این مطلب که مرزهای شعاعی ناحیه مدور در کف ظرف به صورت شعاعی باقی می ماند، در شکل مشخص است.

۲- جریانی از فلز که در حین شکل دهی دیواره های ظرف رخ می دهد، به طور یکنواخت با افزایش ارتفاع کشش، افزایش می یابد. با توجه به این مطلب همان گونه که در شکل دیده می شود، خطوط مشخص شده در شکل

متمرکز باقی می‌مانند ولی فاصله بین آن‌ها افزایش می‌یابد. مرزهای شعاعی بلانک وقتی که روی لبه ماتریس یا حلقه کشش به داخل کشیده می‌شوند موازی باقی می‌مانند.

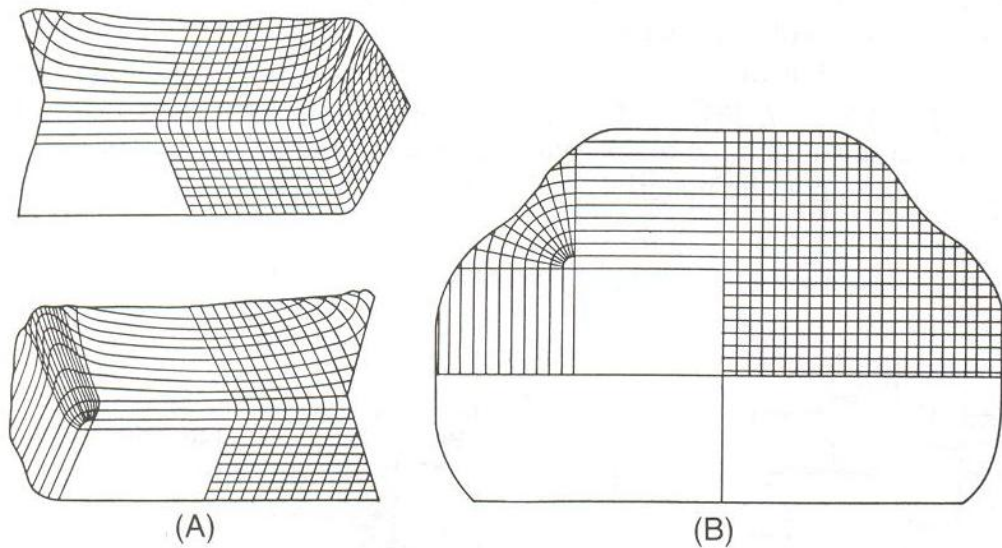
۳- جریان فلزی المان‌های حجمی موجود در پیرامون بلانک گسترده است. این جریان یک تنش فشاری بزرگ را در این ناحیه به وجود می‌آورد، که متعاقب آن ضخامت در این نواحی افزایش می‌یابد. این جریان‌ها در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود. این افزایش ضخامت، در ناحیه ورودی کف ظرف از دیواره به سمت کف ظرف در عمل مهم است ولی در شکل مشخص نشده است. افزایش ضخامت در این نواحی معمولاً کم است، زیرا این نواحی توسط فضای آزاد بین سنبه و ماتریس محدود شده است.

2-2-2 ظروف مستطیلی :

کشش یک ظرف مستطیلی، مقادیر مختلفی از جریان فلز را به وجود می‌آورد. برخی از قسمتهای ظرف ممکن است برای رسیدن به شکل مناسب به یک خمش ساده نیاز داشته باشند، و برخی از دیگر قسمت‌ها ممکن است نیازمند کار سرد زیاد باشند. برخلاف کشش ظروف دایره‌ای که در آن فشار روی قطر یکنواخت است، برخی از سطوح این نوع ظرف تحت کشش به فشار بیشتر و تنش بیشتری نسبت به نواحی دیگر نیاز دارد. کشش اصلی فقط در گوشه‌های ظرف رخ می‌دهد و در دیواره‌ها و کف ظرف حرکت ماده فقط در راستای ایجاد خمش می‌باشد. تنش در گوشه ظرف، روی فلزی که در حال حرکت به سمت شعاع ماتریس است، فشاری است و برای موادی که از روی شعاع حرکت کرده‌اند کششی است. فلز بین گوشه‌ها فقط در دیواره‌ها و سطوح فلانجی تحت تنش کششی می‌باشد.

تغییر در جریان فلز در قسمتهای مختلف ظرف مستطیلی، بلانک را از این نظر به دو ناحیه تقسیم می‌کند. گوشه-ها که در واقع ناحیه کششی نامیده می‌شوند و دیواره‌ها و کف که ناحیه تغییر شکل نام دارد. این ناحیه تغییر شکل شامل فلز لازم جهت ساخت دیواره‌ها و کف ظرف می‌باشد. جهت نشان دادن جریان فلز در حین کشش یک ظرف مستطیلی در شکل A ۲-۴، گوشه ظرف در حال کشش، دارای خطوط پیچیده‌ای است که نمای باز شده آن در شکل B ۲-۴ نشان داده شده است. طرف چپ نمای بالا ناحیه گوشه را به وضوح نشان می‌دهد که این ناحیه با خطوط شعاعی و دوایر هم مرکز تقسیم بندی شده است. مربع‌های طرف راست نمای بالا نشان دهند. المانهای سطحی دیواره ظرف می‌باشند که تنها تحت خمش قرار دارند. جریان شدید فلز در گوشه‌ها، در نمای پایین توسط خطوط شعاعی که به صورت موازی و نزدیک به هم در حال حرکت‌اند نشان داده شده است. خطوط دوایر هم مرکز از مرکز گوشه ظرف به سمت بیرون از هم دور می‌شوند.

خطوط موازی موجود در گوشه‌ها و کف ظرف نشان می‌دهد که یا جریان کم است یا هیچ جریانی در این نواحی اتفاق نمی‌افتد. خم ایجاد شده در ناحیه بالایی این خطوط، جریان فلز از گوشه به سمت دیواره‌ها را نشان می‌دهد. این جریان ارتفاع گوشه‌ها و دیواره‌ها را یکسان کرده و از ایجاد گوشه‌های تیز جلوگیری می‌کند.

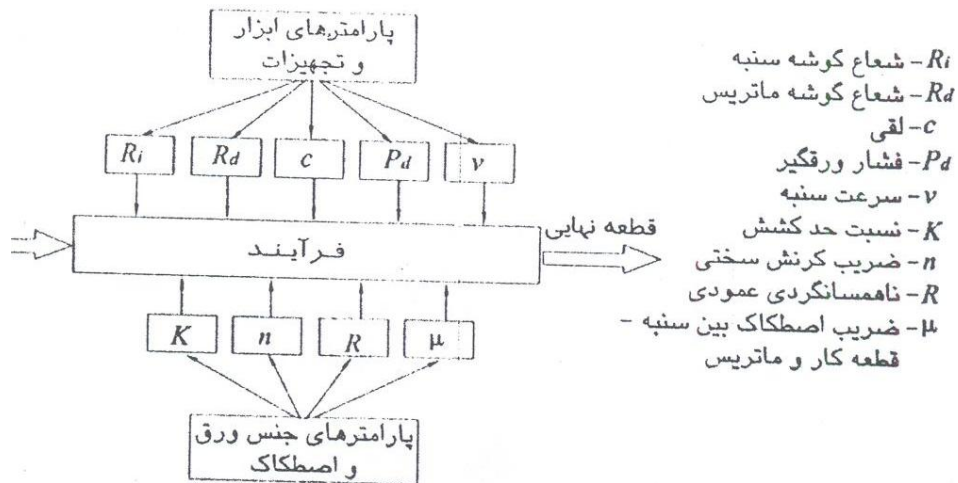


شکل 4-2 جریان فلز در حین کشش یک ظرف مستطیلی [18]

3-2 پارامترهای موثر در فرآیند کشش عمیق:

متغیرهای بسیار مهمی در فرآیند کشش عمیق تاثیر گذارند که میتوان آنها را به صورت زیر مطابق شکل 2-5 طبقه بندی کرد:

- ۱- فاکتورهای جنس ورق و اصطکاک: که شامل نسبت حد کشش، شدت کشش، فاکتور کرنش، ضریب کرنش سختی، ناهمسانگردی عمودی، ضریب اصطکاک میباشد.
- ۲- فاکتورهای تجهیزات و ابزار آلات: که شامل شعاع گوشه سنبه، شعاع گوشه ماتریس، لقی بین سنبه و ماتریس، فشار ورقگیر، سرعت سنبه میباشد.



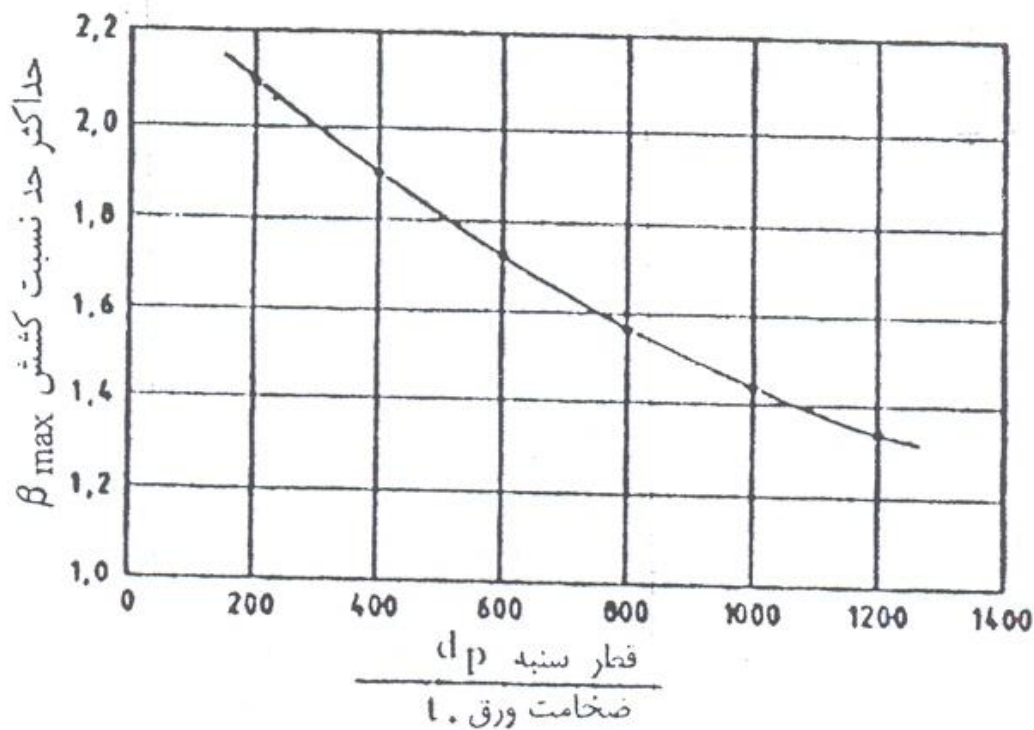
شکل 5-2: پارامترهای موثر در فرآیند کشش عمیق [19]

1-3-2 پارامترهای جنس ورق و اصطکاک

۱- حد نسبت کشش (K):

نسبت $K=D/d$ که در آن D قطر بلانک و d قطر ظرف یا قطر سنبه است را حد نسبت کشش گویند که از لحاظ تئوری حداکثر مقدار K برابر 2.7 می باشد که این مقدار بدلیل صرفنظر نمودن از اصطکاک و اثر خمکاری مقدار واقعی نیست و عملاً کمتر از 2.7 میباشد. این نسبت برای ورقهای فولادی با قابلیت کشش عمیق بسیار خوب حدود 2 است و در شرایط مناسب می تواند به 2.3 برسد.

عموماً حد کشش به نسبت قطر سنبه به ضخامت ورق (d/t) بستگی دارد. مطابق شکل ۲-۶ با افزایش این نسبت حد کشش کاهش میابد. البته مقدار کاهش به جنس ورق بستگی دارد، مقدار متوسط K موقعی که $d/t \approx 200$ باشد به ۲ میرسد. اما معمولاً برای $d/t \approx 100$ به مقادیر بزرگتری از حد کشش میتوان دست یافت.



شکل 2-6: ارتباط بین حد نسبت کشش و نسبت d/t [21]

بررسیهای انجام گرفته توسط پژوهشگران مختلف نشان می دهد که تاثیر n بر نسبت حد کشش β در کشش عمیق، چندان زیاد و قابل ملاحظه است و با افزایش مقدار n خطر تغییر شکل موضعی کاهش یافته و به این ترتیب تمایل به نازک شدن موضعی کاهش می یابد. عامل موثر دیگر برای افزایش حد کشش، روانکاری است. روانکاری فقط برای آن قسمت از ورق که بین قالب و نگهدارنده قرار گرفته است، انجام می شود. همچنین شعاع لبه کف سنبه و شعاع لبه قالب بر حد کشش تاثیر دارد.

حد کشش β را می توان با حرارت دادن موضعی ورق (قسمتی که بین قالب و نگهدارنده قرار دارد) و همزمان با آن خنک کردن موضعی (قسمت کشیده شده) افزایش داد. اما عیب این روش، پایین آمدن مقدار تولید، به دلیل زمان مورد نیاز برای گرم و خنک کردن موضعی ورق، است. گاهی این روش برای فلزات سبک، به دلیل دمای تبلور مجدد پایین، به کار می رود [۲۱].

بطور کلی حد نسبت کشش به چندین کمیت مؤثر وابسته است:

- نوع و خواص مواد، همچنین استحکام و قابلیت ازدیاد طول نسبی
- کیفیت سطحی و عملیات قبلی که بر روی ورق انجام شده
- قوس لبه سنبه، قوس لبه ماتریس و لقی بین سنبه و ماتریس
- اندازه فشار ورقگیر
- نوع مواد روغنکاری و نحوه پاشش آن روی ورق [۲۲].

2- شدت کشش :

شدت کشش غالباً توسط دو نسبت زیر معین می شود :

$$\frac{D}{d} , \frac{d}{D}$$

بیشترین فاکتوری که در اندازه گیری ها به کار گرفته می شود، درصد کاهش قطر یا R_c می باشد :

$$R_c = 100 \left(1 - \frac{d}{D} \right)$$

اگر یک شرایط بهینه در فلز تحت کشش و ابزار کشش موجود باشد، ماکزیمم درصد کاهش قطر در هر مرحله از کشش باید در حدود 50% باشد.

3- فاکتور کرنش :

اندازه گیری های قدیمی بر پایه شدت کشش یا نسبت کشش که در رابطه بالا نشان داده شده است، دقیق نیست و اثر حقیقی کرنش در فلز، بر پایه از دیاد طول در حین عملیات کشش را در نظر نمی گیرد. تغییر شکل پلاستیک یا کرنش در نتیجه کشش بلانک توسط فاکتور کرنش E_c یا فاکتور کرنش پس از n مرحله کشش $E_{c,n}$ بهتر بیان می شود :

$$E_c = \frac{h}{H} = \frac{(D^2 - d^2) 2}{4d(D-d)} = \frac{D/d + 1}{2}$$

$$E_{c,n} = \frac{h_n}{H_n} = \frac{(D^2 - d_n^2) 2t}{4dn(D-d_n)t_n} = \frac{(D + d_n)t}{2d_n t_n}$$

و ماکزیمم فاکتور کرنش نیز با رابطه زیر مشخص می‌شود که e در رابطه زیر ماکزیمم ازدیاد طول در حین شکست می‌باشد:

$$E_{max} = 1 + \frac{e}{100}$$

همچنین قطر میانگین کف ظرف، پس از کشش توسط D قطر بلانک و E_c فاکتور کرنش با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$d = D / (2E_c - 1)$$

جدول ۱-۲ ماکزیمم کاهش قطر و کاهش سطح شماری از فلزات و آلیاژها را تحت شرایط مطلوب قطعات و ابزار کشش به دست می‌دهد.

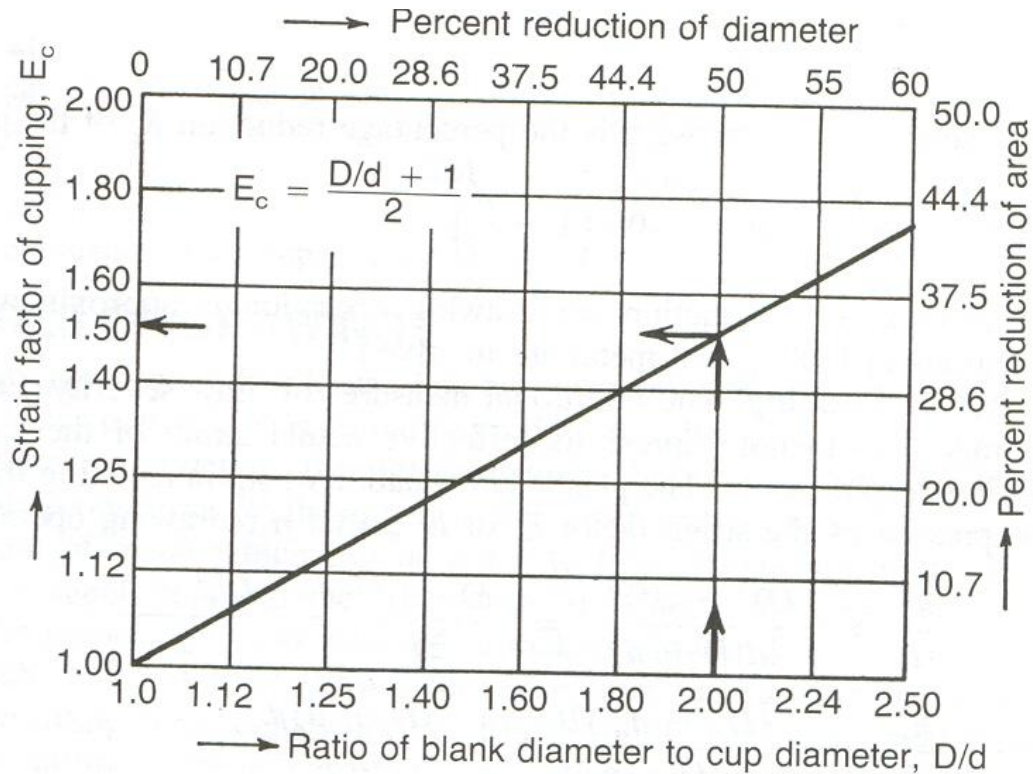
جدول 1-2 [18]

Metal	Reduction in Diam., % (max)*	Cupping Ratio D/d	Strain Factor $E_{c,n}$	Reduction in Area, % (max) †
Aluminum alloys	45	1.80	1.40	28
Aluminum, heat-treatable	40	1.60	1.30	23
Copper, tombac	45	1.80	1.40	28
Brasses, high, 70/30, 63/37	50	2.00	1.50	33
Bronze, tin	50	2.00	1.50	33
Steel, low-carbon	45	1.80	1.40	28
Steel, austenitic stainless	50	2.00	1.50	33
Zinc	40	1.60	1.30	23

$$* = 100(1 - d/D).$$

$$† = 100(1 - a/A).$$

رابطه بین نسبت کشش $\frac{D}{d}$ و فاکتور کرنش E_t در شکل 2-7 نشان داده شده است. این نمودار یک نمودار ساده لگاریتمی است که تحت محاسبات لگاریتمی رابطه بین نسبت کشش و فاکتور کرنش را با یک خط نشان می‌دهد. برای مثال برای نسبت کشش 2، فاکتور کرنش در نمودار 1/5 است.



شکل 7-2 رابطه بین نسبت کشش $\frac{D}{d}$ و فاکتور کرنش E_c

۴- ضریب کرنش سختی (N):

افزایش فاکتور کرنش در مراحل ساخت ظروف تحت کشش افزایش سختی، نقطه تسلیم و استحکام نهایی ماده را به همراه دارد. در کشش عمیق عموماً حد پلاستیک یا استحکام نهایی ماده که توسط نمای کرنش سختی، N مشخص می‌شود، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. دلیل این عمل ملاحظات عملی در حین طراحی ابزار کشش که عملیات کشش تک مرحله‌ای را محدود می‌کند. پیش از ضرورت یافتن آنیلینگ جهت حفظ خواص پلاستیکی ماده، می‌توان بر روی بلانک کشش‌های متوالی انجام داد. استحکام کششی ظرف حاصل از کشش توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_c = S_o \log_e E_c^N$$

طبق این رابطه ماده نرم یا ماده آنیل شده، دارای استحکام کششی S_o می‌باشد. وقتی که روی فلز با بالاترین حد قابلیت خود، کار سختی یا کرنش سختی صورت پذیرد، استحکام کشش نهایی یا S_u در آن پدیدار می‌شود، که در رابطه فوق، توسط ماکزیمم فاکتور کرنش یا E_{max} به دست می‌آیند.

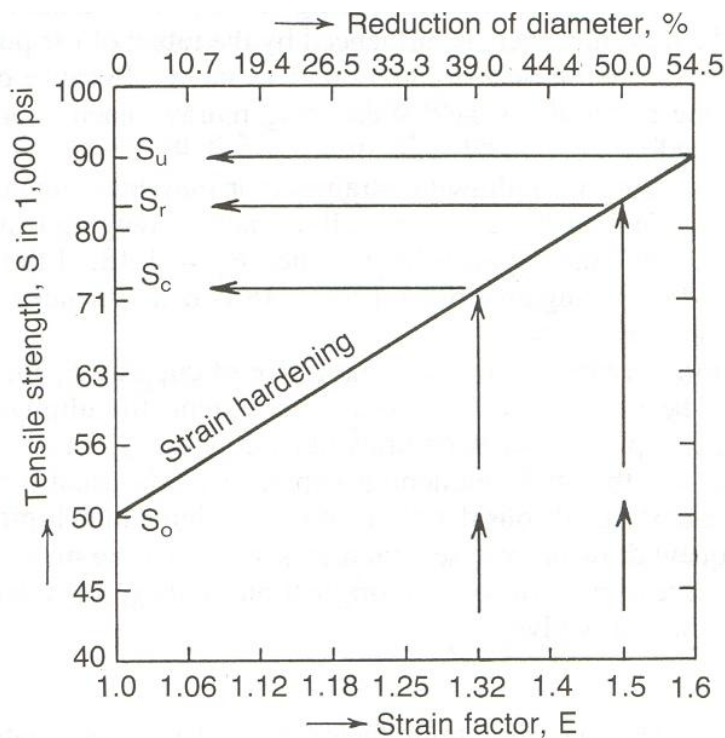
رابطه بین فاکتور کرنش و استحکام کششی بسیاری از فلزات یک رابطه خطی در نمودار لگاریتمی می‌باشد. عموماً خواص مکانیکی مواد توسط تست‌های استاندارد کشش بدست می‌آیند. رابطه بین فاکتور کرنش و استحکام کشش بسیاری از فلزات یک رابطه خطی در نمودار لگاریتمی می‌باشد.

این رابطه خطی در شکل 8-2 با استحکام کشش $S_o = 50000 \text{ psi}$ (345 Mpa) در $E = 1$ و استحکام کششی نهایی $S_u = 90000 \text{ psi}$ (620 Mpa) در فاکتور کرنش ماکزیمم $E_{\text{max}} = 1/6$ ، جایی که ماده به حد شکست می‌رسد، به دست می‌آید. نمودارهای مشابه، برای بسیاری از فلزات دیگر قابل رسم است.

اگر شرایط کششی ماده فاکتور کرنش $E_c = 1/32$ را به وجود آورد، یک استحکام کششی حدود 71000 psi (489 Mpa)، در بالاترین ناحیه دیواره ظرف که بیش از نواحی دیگر تحت کرنش سختی قرار دارد، ایجاد می‌شود.

همان گونه که در شکل 8-2 مشخص است، در بسیاری از موارد استحکام نهایی ماده در مراحل کشش ظرف ظاهر نمی‌شود و ظرف می‌تواند، بدون نیاز به عملیات آنیلینگ مجدداً در زیر قالب کشیده شود. به دلیل اینکه کشش در محدوده تئوری مشخص شده در نمودارها و روابط بطور کامل قابل اطمینان نیست و از یک حاشیه امنیت سستی برخوردار است، ماکزیمم فاکتور کرنش یا E_{max} را با اطمینان کامل نمی‌توان، مورد استفاده قرار داد. می‌توان برای ماکزیمم فاکتور کرنش، مقداری کوچکتر از آن چه که در نمودار دیده می‌شود را در نظر گرفت. برای مثال به جای $E_{\text{max}} = 1/6$ می‌توان از $E_{\text{max}} = 1/5$ استفاده کرد. این مقدار فاکتور کرنش طبق آن چه که از نمودار به دست می‌آید، یک استحکام کشش در حدود $S_r = 82000 \text{ psi}$ (565 Mpa) را به دست می‌دهد. فاکتور مورد نیاز جهت بازکشش توسط معادله زیر به دست می‌آید:

$$E_r = \frac{E_t}{E_c} = \frac{1/5}{1/32} = 1/12$$



شکل 8-2 رابطه بین فاکتور کرنش، کرنش سختی و استحکام کشش [18]