



دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش سازه های هوایی

عنوان:

**بررسی چروکیدگی چندلایه های فلز – کامپوزیتی گرمانرم
در فرآیند کشش عمیق**

استاد راهنما:

دکتر مهران کدخدایان

دانشجو:

علی رجبی ایوری

شهریور ۱۳۹۰

چکیده

چند لایه های فلز- کامپوزیتی (Fiber-Metal Laminate)¹ از لایه های فلز و مواد کامپوزیتی شامل فیبر های تقویت کننده تشکیل شده اند. کاربردهای زیاد کشش عمیق ورق های چندلایه ای، از جمله ساخت قطعاتی که نیاز به متفاوت بودن شرایط محیطی داخل و خارج دارند، صنایع هوافضا، و مخازن تحت فشار چندلایه ای، اهمیت تحقیق روی کشش عمیق این مواد را نشان می دهد.

در این پژوهش ابتدا نحوه تولید دو نوع از چند لایه های فلز-کامپوزیتی گرمانرم، با پایه پلی پروپیلن خود تقویت شده و تقویت شده با الیاف شیشه، آمده است. تولید این چند لایه ها مستلزم ساخت یک قالب گرم تحت فشار برای تهیه فلز-کامپوزیت ها و لایه کامپوزیتی هسته آنها می باشد. در ادامه برای انجام فرآیند کشش عمیق روی این مواد نیاز به داشتن یک پرس هیدرولیکی با امکان اندازه گیری نیرو و جابه جایی فرآیند وجود داشته که با نصب سنسورهای اندازه گیری نیرو و جابجایی و اتصال آنها توسط کارت جمع آوری اطلاعات² به یک کامپیوتر، پرس هیدرولیکی عملاً به یک ماشین (Sheet tester) تبدیل شده است.

پارامترهای زیادی در کشش عمیق ورق های فلز-کامپوزیتی مؤثر می باشند که برای بررسی هدفمند این پارامترها و کاهش تعداد آزمایش ها از روش طراحی آزمایش های تاگوچی استفاده شده است. به منظور مقایسه نتایج، آزمایش ها علاوه بر دو نوع فلز-کامپوزیت ساخته شده، روی نمونه های آلومینیومی نیز انجام شده اند. نتایج آزمایش های انجام شده روی چند لایه های فلز-کامپوزیتی و نمونه های آلومینیومی شامل تعداد و ارتفاع چروک های ایجاد شده و ماکزیمم نیروی شکل دهی که از نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده است، توسط نرم افزار Minitab تحلیل و در ادامه آمده است.

شبه سازی فرآیند کشش عمیق فلز-کامپوزیت ها بخش دیگر پایان نامه بوده است که برای انجام آن ابتدا خواص و ثابت های مهندسی فلز و کامپوزیت مورد استفاده توسط آزمون های استاندارد کشش و

1 - FML

2 - Data Acquisition Card

خمش سه نقطه ای تعیین شده و در ادامه نمودار نیرو-جابجایی کشش عمیق این مواد توسط دو روش Standard و Explicit در نرم افزار ABAQUS بدست آمده و با نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از سیستم اندازه گیری نصب شده روی پرس مقایسه شده است. رفتار فلز-کامپوزیت ها در فرآیند کشش عمیق نشان داد که اثر اکثر پارامترهای فرآیند از جمله نیروی ورق گیر روی میزان چروکیدگی و نیروی شکل دهی تا حد زیادی مشابه رفتار فلزات می باشد. دما تنها پارامتری بود که اثر آن تفاوت قابل ملاحظه ای با فلزات داشت، زیرا با توجه به نتایج آزمایش ها، فلز-کامپوزیت ها حساسیت بیشتری نسبت به دما در مقایسه با فلزات از خود نشان دادند.

فهرست مطالب

VIII	فهرست اشکال
XI	فهرست جداول
۱	فصل اول
۱	مقدمه
۴	فصل دوم
۴	فرآیند کشش عمیق و پدیده چروکیدگی
۵	۱-۲- فرآیند کشش عمیق
۷	۲-۲- پدیده چروکیدگی در فرآیند کشش عمیق
۷	۳-۲- بررسی فاکتورهای موثر بر چروکیدگی
۹	۲-۳-۱- تاثیر نیروی نگه دارنده و عمق کشش عمیق روی ظهور چروکیدگی
۱۱	۲-۳-۲- اثر شعاع لبه قالب و سنبه روی پیدایش چروکیدگی
۱۱	۳-۳-۲- تاثیر اصطکاک روی پیدایش چروکیدگی
۱۲	۴-۲- تحلیل فرآیند کشش عمیق
۱۴	۵-۲- تئوری چروکیدگی
۱۴	۲-۵-۱- بدست آوردن مینیمم نیروی ورق گیر برای جلوگیری از رشد چروک
۱۷	فصل سوم
۱۷	چندلایه های فلز - کامپوزیت
۱۸	۳-۱- معرفی چندلایه فلز-کامپوزیتی
۲۰	۳-۲- مزایای استفاده از فلز-کامپوزیت ها
۲۱	۳-۳- کاربردهای فلز-کامپوزیت ها
۲۴	فصل چهارم

مرور برخی از کارهای انجام شده روی کشش عمیق فلز- کامپوزیت ها ۲۴

۱-۴- اهمیت تحقیق روی کشش عمیق فلز- کامپوزیت ها ۲۵

۲-۴- کار های قبلی روی کشش عمیق فلز- کامپوزیت ها ۲۶

فصل پنجم ۲۸

آماده کردن (Set up) : ۲۸

(طراحی و ساخت قالب - نصب تجهیزات اندازه گیری) ۲۸

۱-۵- طراحی و ساخت قالب کشش عمیق ۲۹

۲-۵- نصب سنسورها و مکانیزه کردن پرس هیدرولیکی ۳۳

۳-۵- کالیبراسیون ۳۶

۴-۵- Set up کامل آزمایش ۳۷

فصل ششم ۳۹

ساخت و تعیین خواص چندلایه های فلز- کامپوزیتی ۳۹

۱-۶- انتخاب و تهیه مواد ۴۰

۲-۶- مراحل ساخت ۴۱

۱-۲-۶- ساخت قالب گرم تحت فشار ۴۱

۲-۲-۶- ساخت چندلایه کامپوزیتی ۴۲

۳-۲-۶- آنیل کردن آلومینیوم ۱۲۰۰ ۴۳

۴-۲-۶- ساخت چندلایه فلز- کامپوزیتی ۴۴

۳-۶- تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی مواد آزمایش ۴۷

۱-۳-۶- خواص فیزیکی ۴۷

۲-۳-۶- خواص مکانیکی ۴۷

۳-۳-۶- بدست آوردن ثابت های مهندسی ماده کامپوزیتی ۵۰

فصل هفتم ۵۴

نحوه انجام و تحلیل نتایج آزمایش ها ۵۴

۱-۷- طراحی آزمایش ها ۵۵

۱-۱-۷- معرفی روش تاگوچی ۵۵

۲-۱-۷- طراحی آزمایش ها به روش تاگوچی ۵۶

۲-۷- نحوه انجام آزمایش ها ۵۸

۱-۲-۷- آماده کردن نمونه های آزمایش ۵۸

۲-۲-۷- انجام دادن آزمایش ها و ثبت پارامتر های خروجی ۵۹

۳-۷- بررسی ماکزیمم نیروی شکل دهی ۶۰

۱-۳-۷- آلومینیوم O-۱۲۰۰ ۶۱

۲-۳-۷- فلز-کامپوزیت با پایه پلی پروپیلن خود تقویت شده ۶۱

۳-۳-۷- فلز-کامپوزیت با پایه پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه ۶۵

۴-۷- بررسی چروکیدگی ۶۷

۱-۴-۷- اثر نیروی ورق گیر روی چروکیدگی ۶۸

۲-۴-۷- اثر دما روی چروکیدگی ۶۸

۳-۴-۷- اثر قطر نمونه ها روی چروکیدگی ۷۱

۴-۴-۷- اثر ضخامت نمونه ها روی چروکیدگی ۷۱

۵-۷- بررسی عوامل واماندگی فلز-کامپوزیت ها در فرآیند کشش عمیق ۷۱

فصل هشتم ۷۵

شبیه سازی فرآیند کشش عمیق و مقایسه آن با نتایج تجربی ۷۵

۱-۸- شبیه سازی فرآیند کشش عمیق در محیط نرم افزار ABAQUS ۷۶

۱-۱-۸- ایجاد هندسه مدل ۷۷

۲-۱-۸- تعریف خواص ماده ۷۸

۸۰	.....تعریف مراحل حل	۳-۱-۸
۸۰	.....تعریف تماس، اعمال شرایط مرزی و بارگذاری	۴-۱-۸
۸۱	.....مش بندی	۵-۱-۸
۸۲	.....اجرای مسأله و مشاهده نتایج	۶-۱-۸
۸۳	.....بررسی صحت مدل سازی	۷-۱-۸
۸۵	.....مقایسه شبیه سازی المان محدود با نتایج تجربی	۲-۸
۸۹	.....
۸۹	.....فصل نهم	
۸۹	.....نتیجه گیری و پیشنهادات	
۹۲	.....پیوست	
۹۳	.....مراجع و منابع	

فهرست اشکال

- شکل ۲-۱- الف) شماتیک برش خورده کشش عمیق قطعه فنجان‌ی شکل ب) مراحل فرآیند کشش عمیق [1]..... ۵
- شکل ۲-۲- نمونه ای از کاربرد استمپینگ و کشش در صنعت اتومبیل سازی [2]..... ۶
- شکل ۲-۳- دو نوع پدیده چروکیدگی در ورق های گرد الف) چروکیدگی در بدنه ب) چروکیدگی در فلنج [3]..... ۸
- شکل ۲-۴- قالب استفاده شده در آزمایش کشش عمیق [3]..... ۹
- شکل ۲-۵- تغییر چروکیدگی بر حسب تغییر نیروی نگه دارنده [3]..... ۱۰
- شکل ۲-۶- ارتباط بین ارتفاع چروکیدگی و عمق کشش [3]..... ۱۰
- شکل ۲-۷- ارتباط بین شعاع لبه قالب و چروکیدگی [3]..... ۱۱
- شکل ۲-۸- تاثیر اصطکاک روی چروکیدگی [3]..... ۱۲
- شکل ۲-۹- الف) کشش یک نمونه استوانه ای از یک ورق دایره ای ب) انتقال نیروهای کششی در اثر نیروی سنبه ۱۳
- شکل ۲-۱۰- الف) فلنج و المانی از کشش عمیق فنجان‌ی ب) یک المان از فلنج قسمت الف..... ۱۳
- شکل ۲-۱۱- مدل تحلیلی چروکیدگی فلنج [4]..... ۱۵
- شکل ۳-۱- شماتیک ورق فلز-کامپوزیت گلر ۲۰
- شکل ۳-۲- سرعت کند رشد ترک و نیز مقاومت زیاد فلز-کامپوزیت GLARE در مقایسه با آلومینیوم T3-۲۰۲۴ [9]..... ۲۱
- شکل ۳-۳- کاربرد فلز-کامپوزیت گلر در قسمت‌های مختلف هواپیمای مسافربری [11]..... ۲۲
- شکل ۵-۱- الف) نقشه ASSEMBLY مجموعه قالب که در نرم افزار SOLIDWORKS طراحی شده است. ب) تصویر مجموعه قالب ساخته شده بر اساس طراحی. ۳۰
- شکل ۵-۲- نمای انفجاری قالب در محیط نرم افزار SOLIDWORKS..... ۳۱
- شکل ۵-۳- یکی از نقشه های استاندارد ترسیم شده برای ساخت اجزای قالب ۳۲
- شکل ۵-۴- سنسور فشار با ورودی روغن یک چهارم اینچ و خروجی آنالوگ ۳۴
- شکل ۵-۵- سنسور جابجایی خطی مغناطیسی برای اندازه گیری جابجایی ۳۵
- شکل ۵-۶- کاربرد کارت دیتا اکوزیشن ۳۵
- شکل ۵-۷- پرس هیدرولیکی ۶۰ تن و مجموعه قالب نصب شده روی آن ۳۷
- شکل ۵-۸- محل استقرار سنسورها و ترمینال کارت دیتا اکوزیشن ۳۸
- شکل ۶-۱- نحوه چیدمان لایه ها در چندلایه کامپوزیتی و فلز-کامپوزیتی ۴۲
- شکل ۶-۲- نمونه کامپوزیت با پایه پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه ۴۳

- شکل ۳-۶- تفاوت نمودار تنش- کرنش آلومینیوم ۱۲۰۰ آنیل شده و آنیل نشده..... ۴۴
- شکل ۴-۶- نمونه لایه چسب تولید شده که بصورت گرد بریده شده است..... ۴۵
- شکل ۵-۶- مراحل ساخت فلز- کامپوزیت از لایه های تشکیل دهنده آن ۴۶
- شکل ۶-۶- مقایسه چگالی های فلز- کامپوزیت با الیاف شیشه و مواد تشکیل دهنده آن ۴۸
- شکل ۷-۶- نمونه های استاندارد تست کشش از جنس کامپوزیت و فلز- کامپوزیت با الیاف شیشه ۴۸
- شکل ۸-۶- نمودار تنش- کرنش فلز- کامپوزیت و اجزای تشکیل دهنده آن ۴۹
- شکل ۹-۶- نمودار تنش ویژه- کرنش فلز- کامپوزیت و اجزای تشکیل دهنده آن ۴۹
- شکل ۱۰-۶- نمودار میانمایی داده های تجربی بدست آمده از تست خمش برای ماده کامپوزیتی ۵۳
- شکل ۱-۷- الف) نمونه آلومینیومی و ب) نمونه فلز- کامپوزیتی با الیاف شیشه، برای آزمایش کشش عمیق ۵۸
- شکل ۲-۷- مجموعه کنترل کننده دمای قالب کشش عمیق ۵۹
- شکل ۳-۷- نمودار ماکزیمم نیروی شکل دهی آلومینیوم بر حسب متغیرهای فرآیند ۶۲
- شکل ۴-۷- تصویر نمونه های تست شده آلومینیومی به ترتیب جدول طراحی آزمایش ها ۶۲
- شکل ۵-۷- نمودار ماکزیمم نیروی شکل دهی فلز- کامپوزیت خود تقویت شده بر حسب متغیر های فرآیند ۶۳
- شکل ۶-۷- تصویر نمونه های فلز- کامپوزیت خود تقویت شده پس از انجام فرآیند کشش عمیق ۶۴
- شکل ۷-۷- نمودار ماکزیمم نیروی شکل دهی فلز- کامپوزیت با الیاف شیشه بر حسب متغیر های فرآیند ۶۶
- شکل ۸-۷- تصویر نمونه های فلز- کامپوزیت تقویت شده با الیاف پس از انجام فرآیند کشش عمیق ۶۶
- شکل ۹-۷- طریقه محاسبه ارتفاع موج چروک ۶۷
- شکل ۱۰-۷- نمودار تعداد چروک های فلز- کامپوزیت خود تقویت شده بر حسب متغیر های فرآیند ۶۹
- شکل ۱۱-۷- نمودار تعداد چروک های فلز- کامپوزیت تقویت شده با الیاف بر حسب متغیر های فرآیند ۶۹
- شکل ۱۲-۷- حاصل ضرب تعداد در میانگین ارتفاع چروک های فلز- کامپوزیت خود تقویت شده بر حسب متغیر های فرآیند ۷۰
- شکل ۱۳-۷- حاصل ضرب تعداد در میانگین ارتفاع چروک های فلز- کامپوزیت تقویت شده با الیاف بر حسب متغیر های فرآیند ۷۰
- شکل ۱۴-۷- بروز پدیده پارگی در نمونه های فلز- کامپوزیتی، الف) تقویت شده با الیاف و ب) خود تقویت شده ۷۳
- شکل ۱۵-۷- مقایسه نمودار بار- تغییر مکان تست -۹ برای جنس های مختلف ۷۳
- شکل ۱۶-۷- بروز پدیده پارگی و جدا شدن لایه ها در نمونه فلز- کامپوزیتی با الیاف شیشه ۷۴

- شکل ۷-۱۷- مقایسه نمودار بار-تغییر مکان تست ۹- برای آلومینیوم و فلز- کامپوزیت با الیاف شیشه..... ۷۴
- شکل ۸-۱- مدلسازی فرآیند کشش عمیق در نرم افزار ABAQUS..... ۷۸
- شکل ۸-۲- تعریف خواص لایه های فلز- کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه در نرم افزار ABAQUS..... ۷۹
- شکل ۸-۳- تعیین ضریب اصطکاک بین آلومینیوم و اجزای قالب..... ۸۱
- شکل ۸-۴- الف) تنش در قطعه آلومینیومی پس از انجام فرآیند ب) نمای برش خورده قالب کشش عمیق..... ۸۳
- شکل ۸-۵- شبیه سازی چروکیدگی در نمونه ای با نیروی ورق گیر صفر..... ۸۳
- شکل ۸-۶- نمودار نیرو-جابجایی حاصل از مدلسازی انجام شده در این پایان نامه در مقایسه با مدلسازی عطریان و فرشته
صنّعی..... ۸۴
- شکل ۸-۷- مقایسه نمونه شکل یافته آلومینیومی با نمونه المان محدود آن..... ۸۶
- شکل ۸-۸- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش و روش المان محدود برای نمونه آلومینیومی..... ۸۶
- شکل ۸-۹- مقایسه نمونه شکل یافته فلز- کامپوزیت خود تقویت شده با نمونه المان محدود آن..... ۸۷
- شکل ۸-۱۰- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش و روش المان محدود برای نمونه فلز- کامپوزیت خود
تقویت شده..... ۸۷
- شکل ۸-۱۱- مقایسه نمونه شکل یافته فلز- کامپوزیت با الیاف شیشه، با نمونه المان محدود آن..... ۸۸
- شکل ۸-۱۲- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش و روش المان محدود برای نمونه فلز- کامپوزیت تقویت
شده با الیاف شیشه..... ۸۸

فهرست جداول

- جدول ۱-۳- انواع چندلایه های مورد استفاده در صنعت..... ۱۹
- جدول ۱-۶- خواص مکانیکی مواد بکار رفته در آزمایش..... ۵۰
- جدول ۲-۶- ضرایب مهندسی ماده کامپوزیتی بکار رفته در شبیه سازی..... ۵۳
- جدول ۱-۷- جدول طراحی آزمایش ها برای نمونه های آلومینیومی..... ۵۷
- جدول ۲-۷- جدول طراحی آزمایش ها برای نمونه های فلز-کامپوزیتی..... ۵۷
- جدول ۱-۸- پارامترهای هندسی قالب..... ۷۷
- جدول ۲-۸- خواص مکانیکی برنج و فولاد ضد زنگ که برای تایید شبیه سازی استفاده شده است [31]..... ۸۴
- جدول ۳-۸- اندازه قسمت های مختلف قالب [31]..... ۸۴

فصل اول

مقدمه

چند لایه های فلز کامپوزیتی و مواد کامپوزیتی مرسوم دارای کاربرد های بسیاری در صنایع دفاعی و صنایع هوافضا می باشند. ویژگی های منحصر بفرد مواد مرکب از قبیل استحکام نسبت به وزن بالا، بهبود میرایی ارتعاشات بدون افزودن وزن اضافی به سازه، خواص خوبی که این مواد در خستگی و ضربه از خود نشان می دهند و سایر کاربرد های ویژه این مواد از عوامل استفاده روز افزون و تحقیق روی این مواد می باشد. یکی از کاربردهای کشش عمیق ورق های چندلایه، ساخت قطعاتی است که نیاز به متفاوت بودن شرایط محیطی داخل و خارج دارند، مانند: مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، عایق یا رسانای حرارت و الکتریسیته که در صنایع هوافضا، مخازن تحت فشار چندلایه ای، صنایع الکتریکی و قسمت های مختلف خودرو مانند گلگیر، شاسی و بدنه کاربرد دارند.

در این پایان نامه که شامل ۹ فصل می باشد کشش عمیق ورق های چند لایه فلز-کامپوزیتی و بویژه پدیده چروکیدگی در این فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. پس از مقدمه در فصل دوم به معرفی فرآیند کشش عمیق پرداخته شده است. تئوری کشش عمیق شرح داده شده و پدیده چروکیدگی به عنوان مهمترین عامل در خرابی نمونه های کشش عمیق معرفی شده است. در فصل سوم نسل جدیدی از مواد چندلایه به نام چندلایه های فلز-کامپوزیتی معرفی شده، مزایای آن ها نسبت به چندلایه های کامپوزیتی مرسوم و فلزات بیان شده و کاربرد های آن ها شرح داده شده است. پس از مرور برخی از کارهای گذشته روی کشش عمیق ورق های فلز-کامپوزیتی در فصل چهارم، در ادامه مراحل اجرایی پایان نامه شرح داده شده است.

در فصل پنجم مراحل آماده نمودن (Set up) آزمایش جهت انجام فرآیند کشش عمیق شرح داده شده است. ترسیم نمودار نیرو-جابجایی در حین فرآیند های شکل دهی ورق نیاز به داشتن یک پرس هیدرولیکی با امکان اندازه گیری نیرو و جابه جایی مانند یک دستگاه تست یونیورسال دارد. با انجام این پایان نامه پرس هیدرولیکی ۶۰ تن موجود مکانیزه شده و توانایی گزارش نیروی شکل دهی بر اساس جابجایی را پیدا نموده است. ویژگی این دستگاه این است که با نصب سنسور های مورد نظر روی پرس

امکان اندازه گیری پارامتر های نیرو و جابجایی برای انواع قالب های شکل دهی مانند : کشش عمیق، کشش دو محوره، برش، اکستروژن، متالورژی پودر و هر قالب قابل نصب دیگر روی آن بوجود آمده است. در فصل ششم نحوه تولید فلز-کامپوزیت های مورد استفاده در آزمایش ها بطور کامل شرح داده شده است. بدین منظور ابتدا نحوه تهیه و تولید مواد تشکیل دهنده آنها آمده و در ادامه فرآیند ساخت آنها بررسی شده است. بدست آوردن خواص فیزیکی و مکانیکی مواد آزمایش در ادامه این فصل بعلاوه جدید بودن مواد ساخته شده با پیچیدگی هایی مواجه بوده است.

پس از آماده شدن مجموعه دستگاه مورد نیاز برای انجام آزمایش ها (Set up) و نیز تهیه نمونه های خام مورد نیاز، اکنون می توان با یک طرح قبلی آزمایش ها را انجام داد. در این تحقیق برای انجام هدفمند آزمایش ها و بررسی اثر پارامترهای مختلف روی خروجی های آزمایش و نیز پیدا کردن پارامترهای بهینه از روش طراحی آزمایش های تاگوجی استفاده شده است. نتایج آزمایش های تجربی پس از تحلیل در نرم افزار Minitab در فصل هفتم مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در فصل هشتم مراحل شبیه سازی فرآیند کشش عمیق چندلایه های فلز-کامپوزیتی بصورت کامل توضیح داده شده است. علاوه بر آن در ادامه فصل مقایسه ای بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از نرم افزار المان محدود صورت پذیرفته است. نتیجه گیری نهایی از پایان نامه و پیشنهادات برای کارهای آیند نیز در فصل پایانی آمده است.

فصل دوم

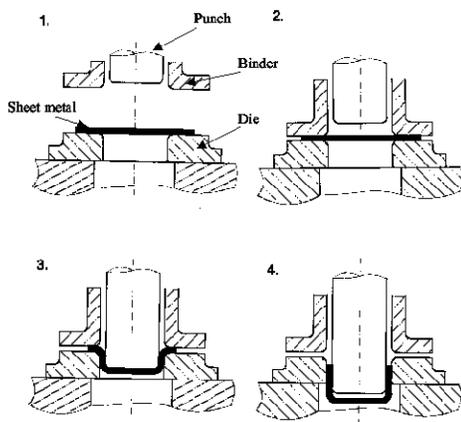
فرآیند کشش عمیق و پدیده

چروکیدگی

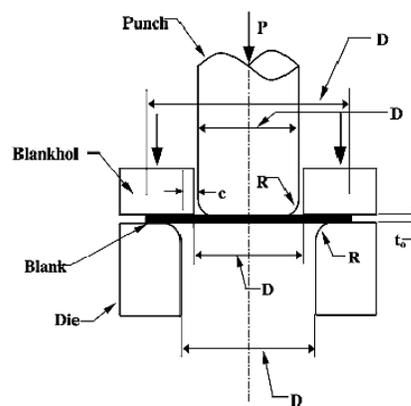
در این فصل به بررسی فرآیند کشش عمیق که یکی از مهمترین فرآیندهای شکل دهی فلزات برای تولید قطعات صنعتی است، پرداخته شده است. تئوری کشش عمیق شرح داده شده و پدیده چروکیدگی به عنوان مهمترین عامل در خرابی نمونه های کشش عمیق معرفی شده است.

۱-۲- فرآیند کشش عمیق

کشش عمیق یکی از مهم ترین فرآیندهای شکل دهی فلزات است که تغییر شکل پلاستیک در آن بدون حذف مواد انجام می شود. در این فرآیند چهار ناحیه مجزا وجود دارد که مکانیک تغییر شکل هر کدام با دیگری اختلاف دارد. شکل (۱-۲-الف) اجزای یک قالب کشش عمیق را معرفی می کند و شکل (۱-۲-ب) نیز مراحل فرآیند کشش عمیق و چهار ناحیه مجزا را در آن نشان می دهد. در ناحیه فلنج، بالاترین انرژی جهت تغییر شکل و غلبه بر اصطکاک مصرف می شود.



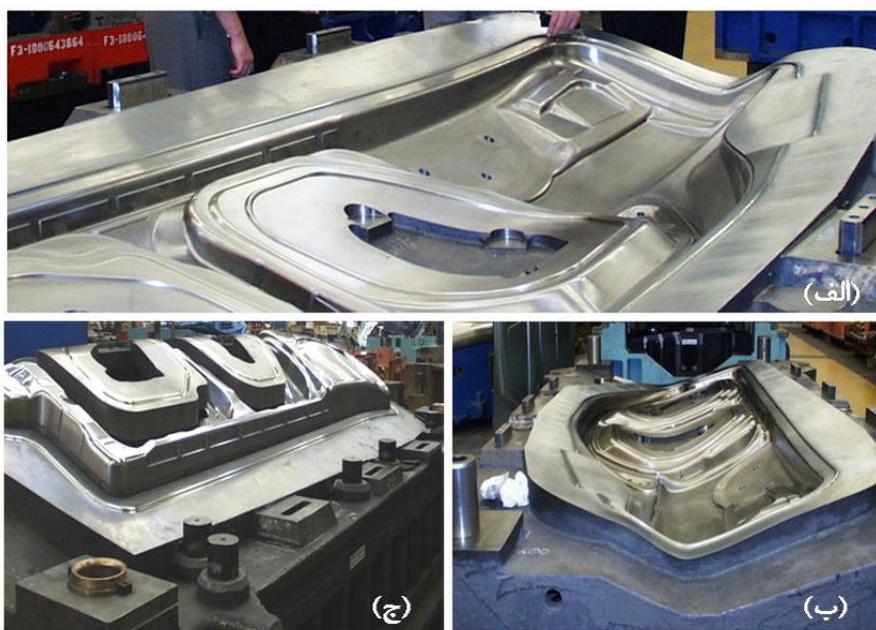
(ب)



(الف)

شکل ۱-۲-الف) شماتیک برش خورده کشش عمیق قطعه فنجانکی شکل ب) مراحل فرآیند کشش عمیق [۱].

در ناحیه شعاع لبه ماتریس، ورق یک بار در هنگام ورود به این ناحیه و بار دیگر به هنگام خروج، تحت خمش پلاستیک قرار می گیرد. علاوه بر آن در این ناحیه بین ورق و لبه ماتریس اصطکاک نیز وجود دارد. در ناحیه دیواره، ورق تحت کشش قرار دارد و بر اساس آن سنبه مانع از تغییر شکل ورق در جهت محیطی می شود، بنابراین در این ناحیه حالت کرنش صفحه ای ایجاد می شود. همچنین بیشترین کاهش ضخامت نمونه، در پایین دیواره مشاهده می شود. آخرین ناحیه، ورق کف سنبه است که بصورت یکنواخت از اطراف در حال کشیده شدن می باشد. همان طور که مشاهده می شود تغییر شکل در کشش عمیق بسیار پیچیده است، زیرا بعضی قسمت های قطعه، تحت کشش، برخی تحت خمش و بعضی قسمت های دیگر تحت فشار قرار دارند.



شکل ۲-۱- نمونه ای از کاربرد استمپینگ و کشش در صنعت اتومبیل سازی [۲].

از فرآیند کشش عمیق و استمپینگ که دو نوع کلی از فرآیندهای شکل دهی ورق های نازک اند در بسیاری از صنایع استفاده می شود، که از جمله آن ها می توان به صنعت خودروسازی، هوافضا، و ساخت

وسایل آسپیزی اشاره کرد. شکل های (۲-۲-الف) تا (۲-۲-ج) نمونه ای از این کاربرد را در ساخت پنل های بدنه اتومبیل نشان می دهند.

۲-۲- پدیده چروکیدگی در فرآیند کشش عمیق

عوامل اصلی واماندگی در فرآیند کشش عمیق شامل چروکیدگی، گوشواره ای شدن و ترک و پارگی می باشند. در بین این عوامل، چروکیدگی دامنه گسترده تری دارد و احتمال رخ دادن آن از سایر عوامل واماندگی بیشتر است. فاکتورهای تاثیرگذار که موجب چروکیدگی می شود عبارتند از : نیروی نگه دارنده قطعه، پارامترهای هندسی قالب، اصطکاک هایی که در طی کشش عمیق بین قطعه و اجزای کاری قالب رخ می دهد، مشخصه های ماده و ناهمسنگردی، شرایط تماس، هندسه قطعه، خواص مکانیکی ماده و عیوب سازه ای.

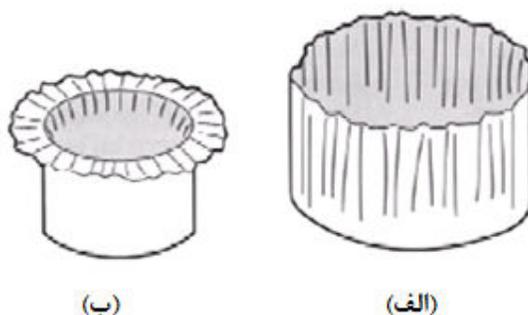
معمولاً با افزایش نیروی ورق گیر می توان چروکیدگی را کاهش داد، اما باید توجه داشته باشیم که افزایش زیاد این نیرو باعث بوجود آمدن ترک و حتی شکست ماده می شود، بنابراین نیروی ورق گیر، یک پارامتر دو جهته است که افزایش آن از یک سو می تواند منجر به پارگی شود و از سوی دیگر کاهش آن منجر به چروکیدگی ماده می شود. پارامترهای هندسی قالب که بر چروکیدگی اثر می گذارند عبارتند از : قطر سنبه و قطر قالب، شعاع لبه سنبه و لبه قالب. در مورد اصطکاک بین قطعه و ابزار، افزایش ضریب اصطکاک مشخصاً چروکیدگی را کاهش می دهد اما مقادیر زیاد ضریب اصطکاک می تواند باعث ترک ها و پارگی ماده شود.

۲-۳- بررسی فاکتورهای موثر بر چروکیدگی

همانطور که شکل (۲-۳) نشان داده شده است، پدیده چروکیدگی مخصوص فرآیند کشش عمیق است و

وابسته به موقعیت آن در قطعه ای که اتفاق می افتد می تواند :

- ناپایداری بدنه قطعه باشد که چروکیدگی دیواره گفته می شود.
- ناپایداری فلنج باشد که چروکیدگی فلنج گفته می شود .



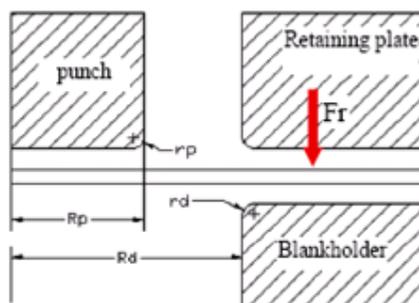
شکل ۲-۲- دو نوع پدیده چروکیدگی در ورق های گرد الف) چروکیدگی در بدنه ب) چروکیدگی در فلنج [3].

در فرآیند کشش عمیق، قطعه خام در اثر نیروهای تغییر شکل دهنده در معرض یک تنش فشاری محیطی و یک تنش کششی شعاعی قرار دارد. که این تنش فشاری محیطی می تواند باعث خطر چروکیدگی شود. زمانی که تفاوت بین قطر خارجی قطعه خام و قطعه نهایی آن زیاد باشد و همچنین در مواردی که ضخامت صفحه کم باشد، احتمال بروز پدیده چروکیدگی بالا می رود .

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف روی چروکیدگی یک سری تست های تجربی توسط اسپنکوزکی روی نمونه فولادی انجام شده است [3]. قالبی که در این آزمایش ها از آن استفاده شده است مطابق شکل (۲-۴) طراحی شده که پارامترهای هندسی آن عبارتند از : شعاع قالب 40 mm، شعاع لبه قالب 7.5 mm، شعاع سنبه 38.2 mm و شعاع لبه سنبه 8 mm. صفحه فلزی استفاده شده با قطر 150mm

و ضخامت 1mm و ماده استفاده شده نیز فولاد کربن دار با درجه بالای شکل پذیری است که مشخصات زیر را داراست :

- مدول یانگ 191 GPa
- نسبت پواسون 0.34
- ثابت تنشی 187 MPa
- ضریب سخت شوندگی 0.189
- مقاومت نهایی ماده 299 MPa



شکل ۲-۴- قالب استفاده شده در آزمایش کشش عمیق [۳].

۲-۳-۱- تاثیر نیروی نگه دارنده و عمق کشش عمیق روی ظهور چروکیدگی

برای مطالعه تاثیر نیروی نگه دارنده F_r روی چروکیدگی با استفاده از قالب شکل (۲-۴) چند آزمایش انجام شده که در آن نیروی نگه دارنده در مقابل ارتفاع چروکیدگی اندازه گیری شده و بر اساس عمق کشش عمیق ترسیم شده است. سرعت کشش ۱۸ mm/min بوده و عمق آن نیز بین ۴۰-۱۰ mm متغیر بوده است. سه نمونه آزمایش که تغییر چروکیدگی را بر اثر تغییر نیروی ورق گیر نشان می دهند