روش جدید فرم‌دهی شبکه‌های نگهدارنده مجتمع سوخت

(Fuel Assembly Grid Spacers)

نظام علی بختیاری*،بهداد سرمدی، علیرضا دمیرچی، حمیدمظاهری، امیر گنجی‌دوست
کارشناسان بخش مکانیک شرکت سوخت اتمی‌رأکتورهای ایران(FMP)، پژوهشکده چرخه سوخت، اصفهان

چکیده: *در این مقاله به یک روش جدید و با دقت و کیفیت بالاتر برای ساخت شبکه‌های نگهدارنده (Grid Spacer) مجتمع سوخت IR40 اشاره شده که درحال حاضر برای ساخت نمونه‌های اولیه آن به کار گرفته شده است. در این روش علاوه بر خواص مکانیکی بهتر، ابعاد دقیق‌تری نسبت به روشهای مشابه دیگر بدست آمده‌است.*

کلیدواژه: *شبکه‌های نگهدارنده، فرم‌دهی، مجتمع‌سوخت*

۱. مقدمه

هر مجتمع سوخت متشکل از چند میله‌ی سوخت، شبکه‌های نگهدارنده، سایر قطعاتی است که با توجه به نوع رأکتور طراحی و ساخته می‌شوند. یکی از قطعاتی که از نظر عملکردی بسیار حائز اهمیت می‌باشد، Grid Spacer یا شبکه نگهدارنده- فاصله‌انداز (شکل ۳) می‌باشد. این قطعه میله‌های سوخت مونتاژ شده درون مجتمع سوخت را مهار می‌کند تا در اثر ارتعاشات موجود در محیط رآکتور به یکدیگر برخورد نکرده و دچار آسیب‌ها و یا تماسهای ناخواسته نگردند. و از طرفی خاصیت ارتجاعی مطلوبی داشته باشد. بنابراین در ساخت این قطعه موارد زیر باید رعایت شود

۱- قطعه از سلولهای مختلفی ساخته شود نه به صورت یکپارچه؛ چون خاصیت ارتجاعی مفیدی نخواهد داشت

۲- نحوه اتصال سلولها به یکدیگر باید به صورت جوش‌نقطه‌ای باشد نه تمام جوش

۳- سلولها باید بدون درز ساخته شوند تا دقت ساخت بالا برود

باتوجه به موارد گفته شده فرایند تکنولوژی و ساخت این قطعه حائز اهمیت می‌باشد. به علت نوع عملکردی که از این قطعه انتظار می‌رود که شامل مهار کردن ارتعاشات محیط درون خود می‌باشد، متریال اولیه استفاده شده باید به صورت Tube باشد تا از نظر ریزساختار دارای خواص مکانیکی و موادی مطلوب باشد. در این مطالعه یکی از روشهایی که بهترین خواص مطلوب را می‌دهد برای تولید این تیوبها ارائه شده است. مسئله دیگری که برای ساخت این قطعه اهمیت دارد دقت ابعادی و هندسی بالای مورد نیاز برای این قطعه می‌باشد که با توجه به اینکه این قطعات بصورت مونتاژی در کنار یکدیگر قرار گرفته و Spot Weld می‌شوند حصول به این دقتها بسیار دشوار بوده و نیازمند در نظر گرفتن تدابیر ویژه در هنگام ساخت و مونتاژ و جوش این

قطعات می‌باشد. از آنجا که این نوع از متریال (تیوب شکل) ذاتا انعطاف‌پذیر می‌باشد، دستیابی به ابعاد دقیق و تکرار پذیر برای ساخت این المانها مشکلات خاص خود را خواهد داشت.

۲. روش تولید لوله‌های جداره نازک (Thin Walled Tubes)

در فرایند شکل دهی لوله‌های جداره نازک تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که در این کار با توجه به نوع هندسه‌ی سلولها دو روش زیر انتخاب شد و مورد آزمایش قرار گرفت که در این مقاله از ارائه داده‌های بدست آمده صرفنظر شده‌است و فقط نتیجه‌ی گرفته شده به عنوان روش مطلوب ذکر شده است

أ. کشش عمیق

در این روش لوله‌ها از ورق‌های نازک در یک قالب کشش عمیق ساخته می‌شوند. مشکلی عمده این روش عدم امکان دستیابی به یک تیوب با دانه‌بندی مناسب و بدون ترک می‌باشد. چرا که ذات این فرآیند موجب تشدید ترکهای موجود در ورق می‌گردد.

ب. فلوفرمینگ یا فلوترنینگ(Flowforming or Flowturning)

در این روش قطعه فورج شده استکانی شکلی(Pre-Form Shaped)، به یک مندرل چرخنده ملحق می‌شود. سه غلطک CNC قطعه فورج شده را روی مندرل و در جهت جلو فشار داده و فلز را مجبور می‌کند در فاز پلاستیکی در جهت محور مندرل جریان پیدا کند نتیجه اینکه این عمل تولید یک قطعه بدون درز با خواص مکانیکی بالا و رویه خوب با دقت تکرار شونده ارائه می‌دهد(شکل ۱). فلوفرمینگ خیلی شبیه به خمکاری است اما یک تفاوت بسیار اساسی با خمکاری دارد. در خمکاری(Spinning) فلزات از یک قطعه نسبتا نازک استفاده می‌شود و با همان قطر اولیه لقمه(Blank)، قطعه نهایی تولید می‌شود ولی در فلوترنینگ ساخت قطعه نهایی، با کار روی ضخامت اولیه لقمه شروع و یک قطعه خیلی نازک‌تر از لقمه اولیه تولید می‌شود.

روش فلوفرم نباید با عملیات تابیدن و یا برگرداندن اشتباه شود. چون مواد در روش تابانیدن قطر کاهش نمی‌یابد و در روش برگرداندن برای افزایش ضخامت جمع نمی‌شود بلکه به همان نسبت که ضخامت را کاهش می‌دهد به همان نسبت حجمی‌به طول می‌افزاید.

مزیت‌های کلی فلوفرمینگ

- فرم‌دهی آلیاژهای فضایی مثل فولادزنگ‌نزن، اینکنل و تیتانیوم. شکل‌دهی این آلیاژها بسیار مشکل است.
- خواص مکانیکی بهتر بواسطه فرایند سردکاری(Cold Working).
- شکل دهی ارزان‌تر نسبت به کشش عمیق.
- دقت ابعادی بالاتر نسبت به کشش عمیق و قسمتهای خمکاری شده.

فرایند فلوفرمینگ یک روش شکل دهی فلز به روش چرخش است که در قطعات استفاده می‌شوند که قسمت کناری آنها پیوسته و بدون هیچ درزی است، اما می‌تواند به شکل دیواره یک مخروط و یا اشکال مخروطی و یا استوانه‌ای باشد.

- مزایا از لحاظ متالورژی و دانه بندی

خواص مکانیکی یک قطعه فلوفرم شده در نتیجه سردکاری (اعمال فشار قوی) که در حین چرخه فرایند رخ می‌دهد، بطور قابل توجهی نسبت به خواص مواد اولیه خود بالاتر است.

نوعاً مواد pre-form تغییر شکل داده‌ی پلاستیکی با کاهش دیواره از اضافی ۷۵٪ ضخامت دیواره،"که باعث یک تغییر و یا پالایش قابل توجهی از دانه بندی و یک جهت گیری مجدد کلی شده" شروع می‌شود و ساختار جزئی دانه‌ها در یک جهت محوری مطلوب هم‌راستا می‌شود. برای دانه‌بندی مجدد می‌توان پس از این فرایند عملیات آنیلینگ را انجام داد.

- مزایا از لحاظ متالورژی و بافت کریستالوگرافیک

در طول فرایند فلوفرمینگ، تمام کریستالها و بافتی (Texture) که شکل اولیه دانه‌بندی را تشکیل می‌دادند، جابه‌جا می‌شوند و جهت‌گیری آنها عوض می‌شود. تقریبا تمام خواص مکانیکی توسط بافت فلز متاثر می‌شود. در یک قطعه فلوفرم شده، سرتاسر بافت، همیشه بصورت یکنواخت جهت دار شده‌اند. برای مثال در مواد HCP (شش ضلعی) مثل تیتانیوم و زیرکونیوم، جهت کریستال‌های فلوفرم شده به طور شعاعی و حول محور قاعده با جهت نیروی اعمالی؛ هم‌راستا می‌شود. این حالت مقاومت دومحوری(Bidirectional) فلز را به طور مؤثری افزایش می‌دهد.(شکل۲). پس از فلوفرم می‌توان بافت کریستالوگرافیک فلوفرم شده را بوسیله عملیات آنیل تشدید کرد.

شکل ۲ تفاوت بین بافت و دانه بندی فلز HCP فلوفرم شده با قطعه‌ی که فلوفرم نشده را نشان می‌دهد.

- مزایا از لحاظ مکانیکی

فلوفرمینگ یک پروسه سردکاری است که در حین فشارقوی که به فلز پایه وارد می‌شود، اساساً مقاومت کششی (Tensile) و مقاومت تسلیم (Yield) مواد شکل داده شده را بالا می‌برد.

به این طریق می‌توان برای اجزای سبک، دیواره‌های نازکی طراحی نمود. عملیاتی مانند آنیل کردن بعد از فلوفرمینگ جهت از بین بردن تنش‌های باقی مانده، انجام می‌شود . در واقع برای بدست آوردن مقاومت و سختی‌های مطلوب؛ قطعه فلوفرم شده آنیل می‌شود.

- خاصیت بدون درز(Seamless): از خواص مهم روش فلو فرمینگ تولید قطعه بصورت یکپارچه است.
- صرفه جویی‌ها

یک امر مهم بخصوص در زمینه کارهایی که مواد اولیه گران قیمتی دارند بحث ضایعات و پِرت حاصل از عملیات است که در این روش بسیار کمتر از روشهای دیگر است

۳. ساخت کارگاهی سلولها

پس از ساخت لوله‌های جداره‌نازک به روش‌های گفته شده در بالا، می‌بایست ابتدا این لوله‌ها فرم داده شوند بعد در دستگاهی مونتاژ شده، قطعه‌ی Spacer ساخته شود. در کارگاه دو روش عمده جهت ساخت قالبهای مخصوص فرم دهی استفاده شد و پس از اندازه‌گیری سلولها به کمک CMM با توجه به دقت ابعادی مورد نظر یکی از این روشها تثبیت شد. این روشها عبارت بودند از:

- **قالب شکل‌دهی ضربه‌ای و همزمان**

در این روش از تعدادی سنبه که انحناهای روی المانها را فرم می‌دهد و یک سنبه مرکزی که به شکل و ابعاد داخلی المانها می‌باشد، برای فرمدهی تیوب ساخته شده استفاده می‌شود(شکل٤). مسئله‌ای که در اینجا حاصل می‌شود برگشت‌پذیری ورق در قسمتهای فرم داده شده می‌باشد که باعث می‌شود المان در دیواره‌ها Buckle کرده و امکان مونتاژ آنها درون فیکسچر جهت جوشکاری وجود ندارد. از طرف دیگر به خاطر ضربه‌ای بودن نیروی فرم، دقت شکل‌دهی در انحناها پایین‌تر از حد مورد نیاز می‌باشد چراکه در این حالت جریان مواد در حین فرمدهی قابل کنترل نمی‌باشد. در شکل ٤ المانها و قالب شکل‌دهی ضربه‌ای نشان داده شده است.

- **شکل‌دهی به‌صورت مرحله‌ای(Progressive)**

در این روش یک سنبه مرکزی شبیه به شکل داخلی المانها وجود دارد که در ابعاد آن کلیه محاسبات مربوط به میزان برگشت‌پذیری ورق و موقعیت تار خنثی اعمال شده است که در این حالت ابعاد المانهای ساخته شده بعد از فرمدهی در محدوده قابل قبول و قابل مونتاژ در فیکسچر خواهد بود(شکل٥و٦). لازم به ذکر است که با توجه به شکل قطعه Grid Spacer و روش مونتاژ المانهای آن در فیکسچر جهت تولید این قطعه، در صورتی که محدوده تلرانسی ابعادی و هندسی این المانها باز باشد جازنی همه المانها درون فیکسچر دچار مشکل خواهد شد.

روش فرمدهی در این حالت به گونه‌ای خواهد بود که جریان مواد در حین فرمدهی کنترل می‌شود چرا که فرمدهی بصورت مرحله‌ای بوده و ازطرف دیگر سنبه‌های شکل دهنده (متحرک) کلیه سطوح خارجی المانها را در بر می‌گیرند و در فرآیند فرمینگ کلیه انحناها به حالت پلاستیک برده می‌شود تا بعد از خروج از دستگاه فرم تغییرات در ابعاد و هندسه آن و برگشت زوایا بسیار جزئی باشد. در قالب مرحله‌ای هر سنبه تنها یک وجه المان را فرم می‌دهد و هنگام فرمدهی المان، سنبه قبلی ورق را بر روی سنبه وسط مهار می‌کند.

٤. نتیجه‌گیری

با توجه به محاسبه‌ای که در حین تولید این قطعه به صورت تئوری انجام شد میزان پرت مواد در فلوفرم کمتر از ۵۰٪ که قابل بازیابی مستقیم است که در حالت نرخ تولید پیوسته (Mass Production) تا زیر ۲۵٪ نیز خواهد رسید ولی در کشش عمیق برای هر المان میزان پرت حدود ۲۵۷٪ محاسبه شد. که میزان پرت در سال برای دو روش فلوفرم و کشش عمیق به ترتیب ۳۰/۸ و ۱۵۸/۳ کیلوگرم زیرکونیوم در سال بدست آمد که رقم دوم قابل ملاحظه است. با آزمایش روش دوم بهنگام کارعملی مقدار پرت حدود ۲۰۰٪ به اثبات رسید. بنابراین روش فلوفرم جهت ساخت تیوبها تثبیت شد.

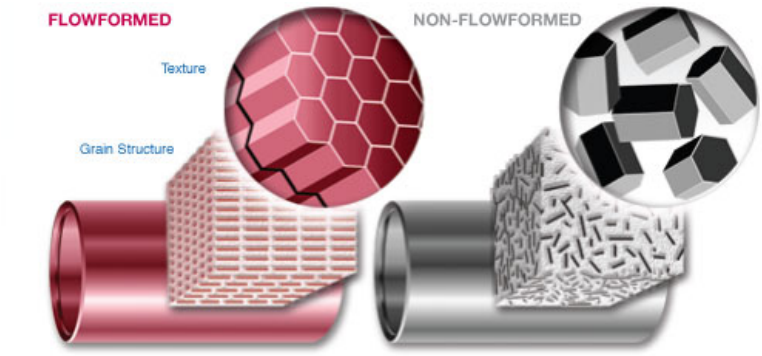
پس از ساخت هر دو نوع قالب و با استفاده از تجهیزات مرتبط تعداد ۳۰ قطعه Spacer از هر دو روش فرم‌دهی ساخته شد که پس از تست ابعادی به کمک CMM و تستهای کشش، به این نتیجه رسیدیم که روش دوم فرم‌دهی لوله‌ها دقت بالاتر و استحکام بالاتری را به سلولها داده و از طرف دیگر Spacer ساخته شده از نظر ابعادی در محدوده‌ی تلرانسهای داده شده می‌باشد و از لحاظ کنترل کیفی نیز تایید شد.

۵. مراجع

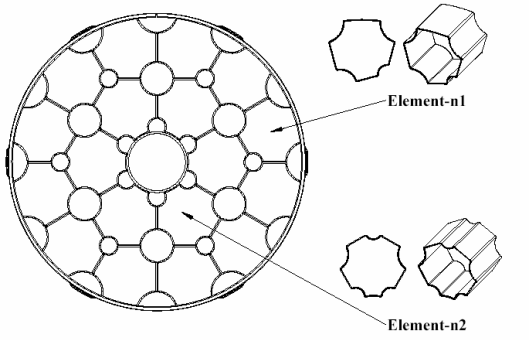
۱- طراحی و محاسبه‌ی انواع قالبهای فلزی، ترجمه غلامحسین اردلان، مؤسسه‌ی انتشارات قائم، ۱۳۷۱

2- www.flowform.com
3- VVER-Nuclear Fuel Production, TVEL Catalogue, 2004
4- http://www.alleghenytechnologies.com
5- RU2223558, Method for Manufacturing Fuel-Assembly Spacer Grid
6- Mechanics of Sheet Metal Forming, Z. Marciniak, J.L. Duncan, and, S.J. Hu, The University of Michigan, USA, 2002

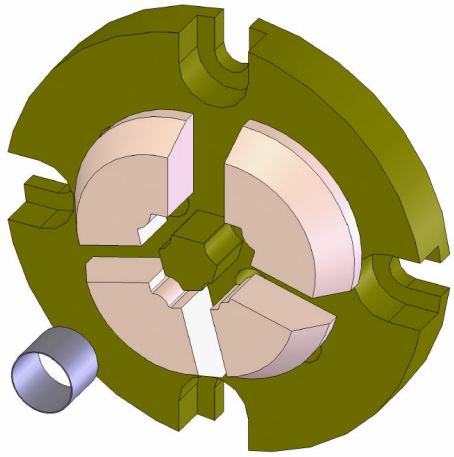
شکل ۱ :دستگاه فلوفرم و غلطکهای آن



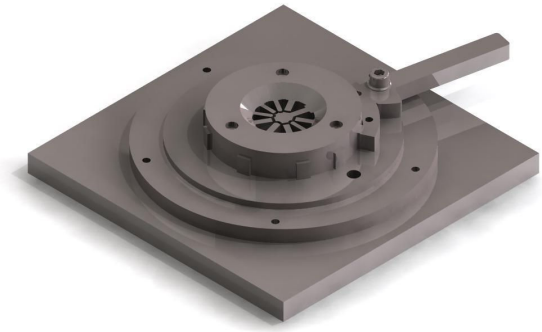
شکل ۱:تفاوت جهت بافت ایجاد شده در فرایند شکل‌دهی با فلوفرم و بدون فلوفرم



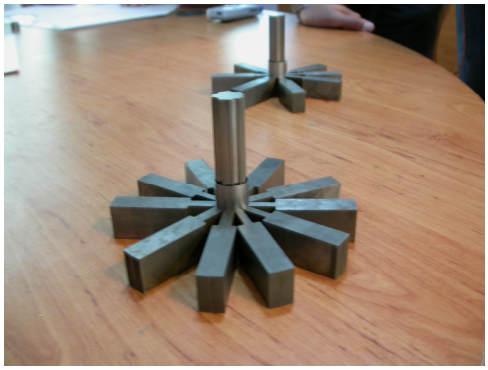
شکل ۲: شبکه‌ی نگهدارنده



شکل ۳:قالب فرم‌دهی ضربه‌ای (آنی)



شکل ٤: قالب فرم‌دهی مرحله‌ای (پیوسته)



شکل ٥:اجزائ قالب فرم‌دهی مرحله‌ای