

شبیه سازی یک فرایند هیدروفورمینگ ورقه ای برای قطعات فنجان‌ی شکل تیتانیومی و اعتبارسنجی

فریبرز فروهنده^۱

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

هیدروفورمینگ ورقه‌ای در بین روش‌های شکل‌دهی به دلیل برتری‌هایی مانند بهبودن کیفیت سطح محصول، نسبت کشش بیشتر، نیاز کمتر به عملیات دوباره مانند ماشین‌کاری متداول گردیده است. تیتانیوم و آلیاژهای آن نه تنها به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا بلکه به دلیل توانایی کار در دماهای بالا بسیار پرکاربرد می‌باشد. در این مقاله فرایند هیدروفورمینگ ورقه‌ای به روش المان محدود شبیه‌سازی شده است. پارامترهای مختلف مانند نیروی ورق‌گیر، نرخ کرنش، فشار سیال، توزیع ضخامت و غیره مورد تحلیل قرار گرفته است. یک دستگاه هیدروفورمینگ ورقه‌ای بر مبنای نتایج حاصل از شبیه‌سازی طراحی و ساخته شده است. دستگاه با انواع فلزات و آلیاژها به خصوص فلز تیتانیوم مورد آزمایش قرار گرفته است. اعتبار مناسبی از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی به دست آمده است. در نهایت خصوصیات مواد محصولات هیدروفورم شده ارائه شده و برتری روش مذکور نسبت به روشهای سنتی به اثبات رسیده است.

کلیدواژگان

هیدروفورمینگ، المان محدود، تیتانیوم خالص تجاری، کامپیوتر به کمک مهندسی

Simulation of a sheet hydroforming process for Titanium cup shape products and validation

Fariborz Forouhndeh¹

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Abstract

Sheet hydroforming process has been come very common between sheet metal forming methods due to some advantages like better surface quality of products, more drawing ratio, less needing to secondary operation etc. Titanium and Titanium alloys are very applicable not only due to high ratio of strength to weight but also because of ability to tolerate work in elevated temperature. In this paper, sheet hydroforming process has been simulated using finite element method. Different parameters like effect of blank holding force, strain rate or ram speed, temperature, fluid pressure, thickness distribution etc have been analyzed. A sheet hydroforming setup based on simulation studies has been designed and fabricated. Setup has been tested for different metals and alloys especially for Titanium. Setup has ability to measure ram speed, blank holding force, total forming load and all the parameters. A good agreement has been found by comparison between simulation and experimental results. Finally, material characterization for sheet hydroformed products has been presented.

Keywords

Hydroforming, Finite element, CP Titanium, CAE

اشکال پیچیده با ضخامت یکنواخت به طور کامل میتواند جایگزین روش های سنتی مانند کشش و کشش عمیق گردد [۱]. تیتانیوم و آلیاژهای آن اگرچه دارای خواص بسیار یگانه و مطلوب مانند نسبت بالای استحکام به وزن، توانایی عملکرد عالی در درجه حرارت بالا و حفظ سختی در این حرارت و همچنین سختی بازیابی و به خصوص کاربردی در صنعت هوافضا می باشد ولی شکل دهی این فلز بسیار مشکل بوده و نیاز به دقت و رعایت قوانین خاصی دارد. مسائلی مانند برگشت فنری بالا، انعطاف پذیری و چکش خواری پایین در دمای اتاق شکل دهی این فلز را امری در خور تامل و تحقیق نموده است. اما در صورت ساخت صحیح محصول، بسیار مناسب برای سازه های پیچیده و سبک و نازک و در عین حال با دوام می باشد.

۱- مقدمه

امروزه شکل دهی فلزات و آلیاژهای سبک بسیار متداول شده است. صنایعی مانند خودرو، هوافضا و بهداشت به دلیل تنوع بسیار زیاد در محصولات تولیدی به شدت نیازمند این روش تولید می باشند.

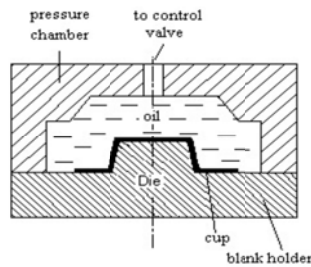
روش هیدروفورمینگ به دلیل قابلیت بالا در تولید قطعات صنعتی بسیار متداول شده است. به طور کلی این روش به دو زیرشاخه هیدروفورمینگ ورقه‌ای^۱ و لوله‌ای^۲ تقسیم می شود. روش مذکور به دلایل ذیل دارای برتریهای شایان ذکری می باشد؛ مستحکم و یکنواخت بودن محصول، نسبت کشش بالاتر، کاهش وزن سازه به دلیل یکسان بودن بیشتر ضخامت و طراحی صحیح تر، نزدیک تر بودن محصول به شکل نهایی مطلوب. در مورد ساخت

1.SHF(Sheet Hydro Forming)
2.THF(Tube Hydro Forming)

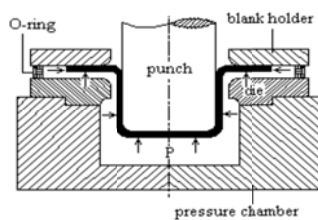
تعریف شده است [۴]. این تحقیق همچنین کاربرد هیدروفرمینگ ورقه ای به جای جوشکاری و برتریهای آن را نشان می دهد. تحقیق جامعی در زمینه شکل دهی یکی از آلیاژهای آلومینیوم (AA6016-T4) به وسیله روش هیدروفرمینگ ورقه ای انجام شده که در آن برتریهای این روش در افزایش توان شکل پذیری این آلیاژ توضیح داده شده است [۵]. مطالعه دیگری در زمینه شکل دهی سوپرپلاستیک با روش هیدروفرمینگ لوله ای انجام شده که به معرفی فلزات و آلیاژهای سوپرپلاستیک پرداخته و اثر نرخ کرنش را بررسی نموده است [۶]. این تحقیق به برتری روش مذکور به دلیل کاهش گوناگونی ضخامت می پردازد.

مطالعه وسیعی در زمینه کنترل چین خوردگی در محصولات آلومینیومی حاصل از هیدروفرمینگ ورقه ای انجام شده است. مطالعه به صورت عددی با معبرسازی توسط مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته است [۷]. در این تحقیق که در مورد آلیاژ آلومینیوم 6111-T4 انجام گرفته اثبات شده که استفاده از ورق گیرتائیر بسزایی در کاهش چین خوردگی در محصولات هیدروفرمینگ ورقه ای دارد. همچنین ثابت شده که استفاده از سیال فشرده از ترکیدگی و پاره شدن ورق جلوگیری می کند. قطعه نیم کره ای شکل مورد استفاده در این تحقیق به طور کامل و سالم تولید شده است. شکل‌های ۲ و ۳ نشانگر دستاوردهای این تحقیق است.

شکل ۴ نمایانگر تولیدات متداول توسط روش هیدروفرمینگ می باشد [۲ و ۱].



(۱)



(۲)

شکل ۱ شماتیک هیدروفرمینگ لوله ای؛ (۱) با استفاده از قالب، (۲) با استفاده از سیمه [۲]



شکل ۲ نتایج عددی و آزمایشگاهی از کشش بدون استفاده از سیال تحت فشار با قطر ۱۰۱/۶ و عمق ۸/۵۰ میلی‌متر [۷]

بهترین و آسانترین روش بررسی رفتار ماده در طی فرایند استفاده از روشهای شبیه سازی المان محدود^۱ و کامپیوتر به کمک مهندسی^۲ می باشد. در این مقاله یک شبیه سازی المان محدود برای فرایند هیدروفرمینگ ورقه ای با استفاده از پکیج 3D Deform انجام شده و شرایط مناسب جهت شکل دهی مطلوب و رسیدن به محصول بدون مشکل و خرابی همراه با کمترین نیروی شکل دهی ممکن حاصل شده است. دو روش مختلف هیدروفرمینگ ورقه ای نخست بدون استفاده از سیمه و با محوریت قالب و سپس با استفاده از سیمه و بدون قالب با یکدیگر مقایسه و نتایج ارائه شده است. فرایند برای دو محصول متقارن و نامتقارن شبیه سازی شده است. بر مبنای نتایج مطلوب شبیه سازی یک دستگاه کامل هیدروفرمینگ طراحی و ساخته شده است. دستگاه برای فلزات و آلیاژهای مختلف به خصوص فلز تیتانیوم خالص تجاری^۵ مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه سازی در شرایط مرزی یکسان مقایسه شده و اعتبارسنجی مناسب برای روش شبیه سازی حاصل شده است. محصولات بدون خرابی به خصوص از جنس تیتانیوم به دست آمده و ارائه شده است و در نهایت با استفاده از روش مشاهده ریزساختار محصولات، روش مذکور با روش های سنتی مقایسه شده و برتری آن اثبات شده است.

شایان ذکر است که پیشینه تحقیق در مورد روش هیدروفرمینگ ورقه ای توسط نگارنده در تحقیقی گسترده مورد بررسی و ارائه قرار گرفته است [۱].

مهم ترین تحقیقات در این زمینه از سالهای ۱۹۹۰ تا کنون مورد بررسی قرار گرفته و تحقیقی در زمینه هیدروفرمینگ ورقه ای آلیاژهای تیتانیوم صورت نگرفته است. همچنین ریزساختار محصولات حاصل از این روش نیز جزو مواردی است که هنوز نیاز به تحقیق و بررسی دارد. در اینجا نتایج برخی از مهم ترین تحقیقات ارائه می گردد؛

به طور کلی روش هیدروفرمینگ ورقه ای به دو دسته ساده یا به کمک قالب و کشش هیدرومکانیکی اجسام لیوانی شکل یا به کمک سیمه تقسیم می شود. در این فصل اثبات می گردد که روش هیدروفرمینگ با سیمه مفیدتر و با استفاده از نیروی شکل دهی کمتری صورت می گیرد. شکل ۱ دو روش هیدروفرمینگ ورقه ای را نمایش می دهد [۲].

در حالت هیدروفرمینگ با قالب، به جای سیمه سیال پر فشار ورق را از بین ورقگیر به روی قالب می فشارد و چون سیمه با سیال جایگزین شده محدودیت شکل به لحاظ زوایای منفی وجود ندارد و در واقع این دسته هیدروفرمینگ ورقه ای ساده می باشد (شکل ۱(۱)). دسته دوم به جای قالب پروفیل کوچکی از قالب موجود است که فقط باعث هدایت ورق می شود و پانچ ورق را فرم داده از بین ورقگیر به پایین می کشد ولی قالبی وجود ندارد و فضای محفظه قالب مملو از سیال است که با فشار معکوس به سمت سیمه شکل دهی نهایی به ورق پایان می پذیرد. در این روش هزینه ابزار نیز کاهش می یابد (شکل ۱(۲)).

تحقیق جامعی در رابطه با عمر روش هیدروفرمینگ صورت گرفته و به نکات شکل دهی قطعات لوله ای و تخت از طریق این روش پرداخته شده است. در این تحقیق کاربردهای قطعات تو خالی و روش تولید به وسیله هیدروفرمینگ لوله ای توضیح داده شده است [۳].

تحقیق موثری در زمینه شکل دهی ورق های دو تایی با روش هیدروفرمینگ ورقه ای انجام شده است و به کمک روشهای حل عددی و مطالعات آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و یک کلاس جدید در این فرایند

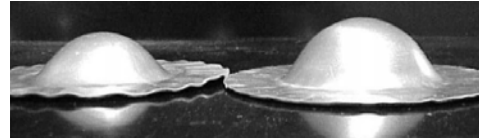
3.Finite Element Simulation
4.CAE(Computer Aided Engineering)

از سمبه و با محوریت قالب می باشد بدین منظور به طور مجازی منطقه تحت فشار سیال از بالا مشخص شده و در شرایط مرزی اعمال می گردد. ورق تحت فشار سیال روی سطح قالب پایین کشیده شده و شکل می گیرد. شرایط مرزی اولیه به شرح زیر است؛ فشار سیال روی سطح ورق تا ۵ مگا پاسکال، فشار ورق گیر تا ۲ مگا پاسکال، ضریب اصطکاک کلومب حدود ۰/۰۸ که انتخاب این عدد نتیجه تحقیقات گذشته می باشد [۱۰].

جدول ۱ خواص ماده و پارامترهای اولیه برای شبیه سازی هیدروفرمینگ قطعه

فنجانگی	
مقدار عددی	شرایط و خصوصیات و ابعاد ابزار و ماده قطعه کار
۸۰ و ۱۰۰ میلیمتر	قطر ورق اولیه
۱/۱ میلیمتر	شعاع گوشه قالب
۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد	دمای اولیه کاری
تیتانیوم خالص تجاری درجه ۱	ماده ورق
۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۵ میلیمتر	ضخامت ورق
	خصوصیات مواد [۹]
۱۰۵ گیگا پاسکال	مدول یانگ
۲۴۱ مگا پاسکال (با نرخ کرنش ۰/۰۱) و ۶۲۰ مگا پاسکال (با نرخ کرنش ۰/۱)	تنش حد نهایی
۱۷۲ مگا پاسکال (با نرخ کرنش ۰/۰۱) و ۴۴۵ مگا پاسکال (با نرخ کرنش ۰/۱)	تنش تسلیم
۰/۳۷	نسبت پواسن
۰/۰۸	ضریب اصطکاک
۲۴٪	درصد افزایش طول در نقطه شکست
۱۸۰-۱۲۳	سختی ویکرز

به طور کلی کار شبیه سازی برای هر دو حالت هیدروفرمینگ ورقه ای انجام شده و برتری استفاده از روش دوم یعنی با محوریت سمبه، حذف قالب و استفاده از محفظه سیال تحت فشار و فشار معکوس سیال اثبات می شود. در حالت دوم سمبه به پایین آمده ورق را با خود از بین پروریل قالب به پایین می کشاند. از آنجائیکه کوپته قالب موجود نیست ضریب اصطکاک کمتر بوده نیروی کلی مورد نیاز جهت شکل دهی کمتر می باشد. از سوی دیگر سیال فشرده شده از سوی پایین ورق را به روی سمبه می فشارد (مانند شکل (۲)). پس از تغییرات بر روی پارامترهای مختلف مانند ضریب اصطکاک، نیروی ورق گیر، سرعت سمبه، دمای کاری و قالب، شعاع گوشه قالب و ماتریس و بررسی نتایج شبیه سازی با هدف دریافت محصول بی نقص با حداقل نیروی مجموع شکل دهی عمل بهینه سازی صورت گرفته است. مشخص شد که دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، فشار ۵ مگا پاسکال، فشار ورق گیر ۲ مگا پاسکال شرایط مناسبی را القاء می کند. موارد بیشتر و کمتر با مشکلات ناقص بودن شکل نهایی و یا افزایش قابل توجه نیروی شکل دهی مواجه شده است. در این مقاله اشکال قطعه با شکل گیری مناسب و حداقل خطا و نیروی شکل دهی نمایش داده می شود.



شکل ۳ نتایج آزمایشگاهی کشش بدون استفاده از سیال تحت فشار (سمت چپ)؛ عمق کشش: ۱۷/۸ میلیمتر و با استفاده از سیال تحت فشار (سمت راست)؛ عمق کشش ۳۰/۵ میلیمتر [۷]



شکل ۴ شکل های متداول محصولات هیدروفرمینگ [۱۰]

۲- شبیه سازی المان محدود برای فرایند هیدروفرمینگ ورقه ای

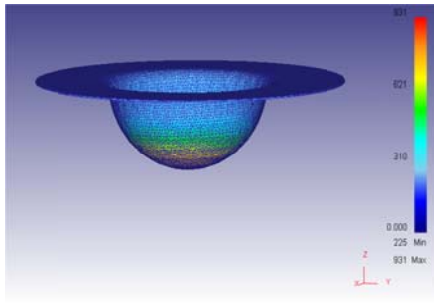
فرایند توسط نرم افزار دیفرم شبیه سازی شده است. پارامترهای مختلف مانند ضریب اصطکاک، نیروی ورق گیر، سرعت سمبه، دمای کاری و قالب، شعاع گوشه قالب و ماتریس و... مورد تغییر قرار گرفته اند و شرایط مطلوب کاری با هدف به دست آوردن محصول بی عیب و سالم همراه با کمترین نیروی شکل دهی ممکن انتخاب شده است. مدل اولیه قالب و ورق در حالت هیدروفرمینگ ساده تعریف شده و به نرم افزار وارد می شود. مواد مورد استفاده یا انتخابی در قطعه کار از کتابخانه فراخوانده می شود و یا تک تک خواص تعریف شده و ذخیره می گردد و در نهایت مورد استفاده قرار می گیرد. شرایط اصطکاکی و نوع اصطکاک و سطوح تحت تماس به نرم افزار معرفی می گردد. همچنین در قسمت اعمال شرایط مرزی، تمامی سطوح تحت فشار، مسیر اعمال نیرو یا فشار، کاهنده یا افزایشنده بودن فشار/نیروی مشخص می گردد. حرکت سمبه به لحاظ خطی و یا چرخشی بودن با توجه به سرعت متناظر تعریف شده و به نرم افزار وارد می شود. در نهایت اطلاعات به صورت دیتا بیس ساخته و ذخیره شده و آماده حل در مرحله دوم می گردد. جدول ۱ نشانگر خواص ماده قطعه کار در ورودی نرم افزاری باشد. در مورد تعداد نود و المان لازم به ذکر است که از ۲۴۶۴۶ عدد نود و ۷۲۹۴۰ عدد المان چهارضلعی استفاده شده است. از روش تکرار نیوتن-رافسون جهت حل معادلات المان محدود فرایند استفاده شده و ماده کشسان-مومسان در نظر گرفته شده است و این انتخاب ها به پیشنهاد خود نرم افزار جهت حل صحیح و به واقعیت نزدیک تر صورت گرفته است [۸].

در مورد جزئیات هندسی فرایند لازم به ذکر است که ابعاد قالب ۱۰۰×۱۰۰×۵ میلیمتر بوده و شکل قالب اولیه به شکل نیم کره با شعاع ۲۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. حالت مطالعه اولیه فرایند بدون استفاده

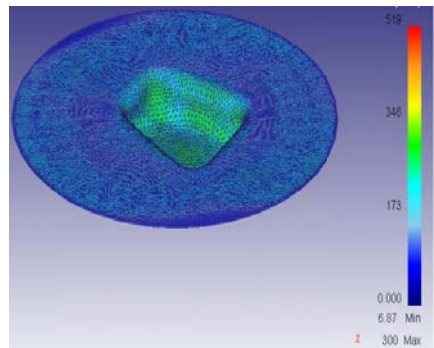
قرار گرفتن سلول سنجش نیرو (کل نیروی لازم جهت شکل دهی) از جنس فولاد ریخته گی، f- سمبه، g- سیستم ورق گیر شامل دو صفحه، چهار پیچ و سه حلقه فولادی از جنس فولاد تندبر که با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته اند و یکی از آنها شامل کرنش سنج می باشد. لازم به ذکر است که ورق روی صفحه پایینی ورق گیر و زیر صفحه بالایی قرار می گیرد و چهار پیچ به طور مساوی و متعادل بسته شده و روی صفحه بالایی را فشار داده و نیروی ورق گیر اعمال می شود. پیرامون پیچها درجه بندی شده و بدین ترتیب از مساوی بسته شدن پیچ ها اطمینان حاصل می شود. h- پروفیل قالب و سیستم آب بندی، i- بدنه محفظه سیال قالب از جنس فولاد ریخته گی، j- شیر کنترل سرعت و فشار سیال که به لوله هیدرولیک خروجی در دستگاه هیدرولیک وصل شده است، k- محفظه قالب یا فضای سیال.

۳- مدل اصلاح شده یا کشش هیدرومکانیکی قطعه فنجانگی

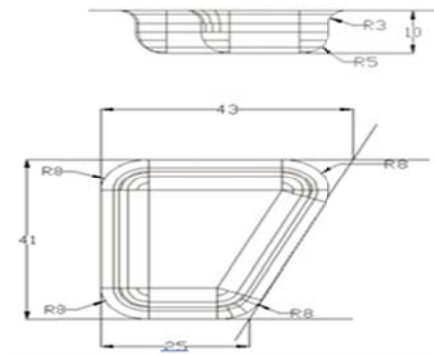
شکل ۵ نشانگر مدل اصلاح شده یا حالت دوم هیدروفرمینگ ورقه ای یا کشش هیدرومکانیکی قطعه فنجانگی است. پس از مطالعه شبیه سازی و مقایسه نکاتی مانند نازک شده گی دیواره ورق و نیروی نهایی شکل گیری مشخص شد که روش دوم با محوریت سمبه روش مناسب تری در هر دو مورد قطعه متقارن و نا متقارن می باشد. جدول ۲ به مقایسه این دو روش بر حسب نیروی لازم جهت شکل دهی پرداخته است. شکل ۶ نشانگر توزیع تنش در قطعه نهایی مطلوب در حالت دوم در قطعات متقارن، نا متقارن و همچنین هندسه قطعه نا متقارن می باشد. تمامی این اشکال در مورد قطعات مطلوب و بهینه شده با نکات مذکور می باشند. در قسمت های بعد نقاط مهم مطالعات عددی با عملی مقایسه شده و نتایج شبیه سازی نیز ارائه می گردد.



(۱)



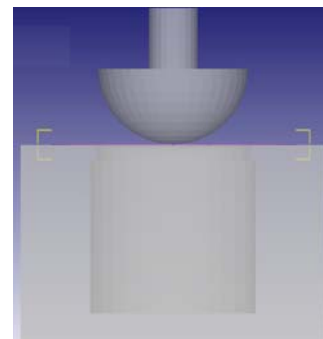
(۲)



(۳)

شکل ۶ توزیع تنش در قطعه نهایی مطلوب (۱) متقارن، (۲) نامتقارن، (۳) هندسه قطعه نا متقارن

فرمولهای تجربی در راستای میزان لقی بین سمبه و پروفیل قالب در راستای جلوگیری از نازک شدگی موجود می باشد. همچنین شعاع گوشه



شکل ۵ مدل اصلاح شده، حالت دوم هیدروفرمینگ ورقه ای یا کشش هیدرومکانیکی قطعه فنجانگی

جدول ۲ مقایسه نیروی مورد نیاز شکل دهی در دو حالت هیدروفرمینگ ورقه ای ساده و با محوریت سمبه

نیروی شکل دهی مورد نیاز (نیوتن)	فرایند هیدروفرمینگ ورقه ای
۴/۷×۱۰۰۰۰	حالت اول با کوپته قالب
۳/۴۳×۱۰۰۰۰	حالت دوم با محوریت سمبه

۴- طراحی و ساخت دستگاه هیدروفرمینگ ورقه ای

در راستای امکان انجام مطالعات آزمایشگاهی نیاز به ساخت یا داشتن یک دستگاه هیدروفرمینگ با شرایط یکسان مرزی، هندسی و غیره نسبت به شبیه سازی می باشد تا بتوان به مطالعات شبیه سازی اعتبار بخشید. دستگاه مذکور توسط نگارنده طراحی و ساخته شده و هم اکنون در آزمایشگاه تولید پیشرفته انستیتو فنی هند - بنارس هندوستان نصب شده و در حال استفاده می باشد. دستگاه قابلیت تولید در شرایط مختلف دمایی و اصطکاکی و همچنین اشکال هندسی متفاوت متقارن و نا متقارن را دارا می باشد. شکل ۷ نشانگر طراحی کلی و جزئی دستگاه و مجموعه قالب و جدول توضیحات بوده و شکل ۸ بیانگر تصویر کامل دستگاه ساخته شده می باشد. دستگاه بر مبنای هیدروفرمینگ ورقه ای حالت دوم با محوریت سمبه یا به عبارتی کشش هیدرومکانیکی قطعات فنجانگی شکل طراحی شده و عمل می کند. نحوه عملکرد در قسمت ۲ توضیح داده شده است.

اجزا استفاده شده در مجموعه قالب به شرح زیر است: a- مکانهای تعبیه شده برای قرار دادن ترموکوپل، b- ورودی لوله هیدرولیک، c- سوراخهای راه به در جهت قرار گیری گرم کننده های فشنگی (کارتریج)، d- سلول های سنجش نیرو (از جنس فولاد تند بر)، e- گیرنده سمبه شامل فضایی برای

تجاری با درجه ۱، نتایج بسیار مطلوبی حاصل شده است که نمونه ای از آن در شکل ۹ برای ماده تیتانیوم نمایش داده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج مطالعات آزمایشگاهی بسیار نزدیک بوده و به خصوص برای محصول از جنس تیتانیوم به معتبر سازی روش شبیه سازی انجامیده است. مشخص شد که نیروی ورق گیر ۶۰۰ کیلوگرم نیرو، فشار معکوس سیال ۶۰۰ مگا پاسکال، سرعت سمبه برابر ۰/۵ (ثانیه / میلیمتر)، و دمای اتاق ۲۵ درجه سانتیگراد شرایط مطلوب شکل دهی را اعمال می کند. روغن هیدرولیک معمولی جهت کاهش اصطکاک استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی در شرایط مرزی یکسان دارای درصد خطای ۵/۸٪ بوده که عدد قابل قبولی است و در جدول ۳ این معتبرسازی گزارش شده است. همچنین نمونه محصول تیتانیومی در شکل ۱۰ با تمامی پارامترهای موجود ارائه شده است. یک سکه جهت سنجش و مقایسه در تصویر مشاهده می گردد. از شکل مشهود است که کمترین اشکال یا خرابی در قطعه وجود ندارد. شرایط در جدول ۳ توضیح داده شده است. شکل ۱۱ شرایط مطلوب و قطعه سالم نا متقارن را نشان می دهد. این مورد نیروهای ورق گیر و فشار معکوس سیال و سرعت شکل دهی مانند مورد متقارن بوده و ضخامت ورق ۰/۴ میلیمتر و عمق شکل دهی ۱۰ میلیمتر می باشد. نیروی کل مورد نیاز جهت شکل دهی ۴/۲ تن مشاهده شده است.

۶- مطالعات پارامتری فرایند؛ مقایسات نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی

یک مطالعه گسترده پارامتری با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایشگاهی انجام شده است. مطالعه در راستای یافتن اثر هر یک از پارامترها بر نیروی کلی مورد نیاز جهت شکل دهی و همچنین یافتن موثرترین پارامتر بر این نیرو می باشد. در این راستا مشخص شده که نیروی ورق گیر بیشترین تاثیر را بر نیروی شکل دهی می گذارد که البته این نکته در روشهای معمولی کشش نیز قبلا به اثبات رسیده است [۱۰]. شکل ۱۲ (۱) اثر نیروی ورق گیر و ۱۲ (۲) اثر سرعت سمبه را بر نیروی کل مورد نیاز شکل دهی در دو حالت شبیه سازی و آزمایشگاهی نشان می دهد. از آنجائیکه شکل دهی تیتانیوم به نرخ کرنش بیشتر از کرنش حساس می باشد لذا اثر سرعت سمبه بسیار قابل تامل و غیر قابل چشم پوشی می باشد و این پارامتر باید بسیار کم در نظر گرفته شود وگرنه نیروی شکل دهی به شدت افزایش پیدا کرده و قطعه با خرابی بالا یا ترکیدگی مواجه می شود. از طرفی سرعت بسیار کم باعث چین خوردگی و گوشه دار شدن ناحیه لبه و حتی دیواره می گردد [۱۰ و ۱۱].

شکل ۱۳ تغییرات ضخامت قطعه نهایی را بر مبنای فاصله از مرکز نقل قطعه در حالات شبیه سازی و آزمایشگاهی برای قطعه متقارن (۱۱۳) و نامتقارن (۲) نشان می دهد.

۷- به دست آوردن خواص مواد محصولات با استفاده از تحلیل ریزساختار

در نهایت به دنبال به دست آوردن برتری روش هیدروفورمینگ ورقه ای نسبت به محصول مشابه با استفاده از روشهای مرسوم کشش از تحلیل ریزساختار فلزی محصولات استفاده شده است. بدین ترتیب که شکل متقارن توصیف شده در مقاله با هر دو روش هیدروفورمینگ و کشش معمولی بدست آمده و از سه منطقه کناره (بدون کشش)، میانی (کشش نیمه) و مرکز گنبد مانند محصول (بیشینه کشش)، سه نمونه دایره ای شکل به ترتیب با اندیس ۱ و ۲

سمبه را ۳ تا ۵ برابر بزرگتر از شعاع گوشه پروفیل قالب در نظر می گیرند و شعاع پروفیل قالب یا ماتریس حدود ۳ تا ۱۰ برابر ضخامت ورق در نظر گرفته می شود [۱۰]. لقی مذکور از فرمول (۱) محاسبه می گردد:

$$u_D = t + 0.04\sqrt{10t} \quad (1)$$

که در آن u_D لقی و t ضخامت ورق در نظر گرفته شود. فرمول فوق به خصوص برای فلزات غیر آهنی مانند تیتانیوم کاربرد دارد [۱۰].

در راستای ساخت دستگاه نشان داده شده در شکل ۸ لازم به ذکر است که این دستگاه بر مبنای نتایج حاصل از شبیه سازی طراحی و ساخته شده و با استفاده از سلول های سنجش نیروی استاندارد کالیبره شده است. در جهت اندازه گیری دقیق نیروی کل شکل دهی و همچنین نیروی ورق گیر، دستگاه های الکترونیک کالیبره شده به همراه سلولهای سنجش نیرو به دستگاه متصل شده است. با جدول و چارت کالیبراسیون هر عدد مشهود در دستگاه معادل یک نیرو بوده و نیروهای مذکور نوشته می شوند. یک دستگاه کالیبراسیون جداگانه جهت کالیبره کردن سلولهای نیرو سنج استفاده شده که نیروهای اعمالی با عددی در دستگاههای الکترونیک متناظر خواهند بود. در دستگاه ساخته شده نیروی کل مورد نیاز جهت شکل دهی (توسط سلول سنجش نیرو و دستگاه الکترونیک متصل)، نیروی ورق گیر (توسط سلول سنجش نیروی جداگانه و دستگاه الکترونیک متصل جدا)، فشار معکوس سیال فشرده شده (توسط فشار سنج دستگاه هیدرولیک)، سرعت حرکت سمبه یا به عبارتی سرعت شکل دهی (توسط محاسبه سرعت با استفاده از طول کورس و زمان)، طول کورس (توسط کولیس دیجیتال متصل به دستگاه) و دمای قالب (توسط دماسنج های کارگذاشته شده در نقاط مختلف) قابل اندازه گیری می باشد.

جدول ۳ اعتبارسنجی برای محصول از جنس تیتانیوم

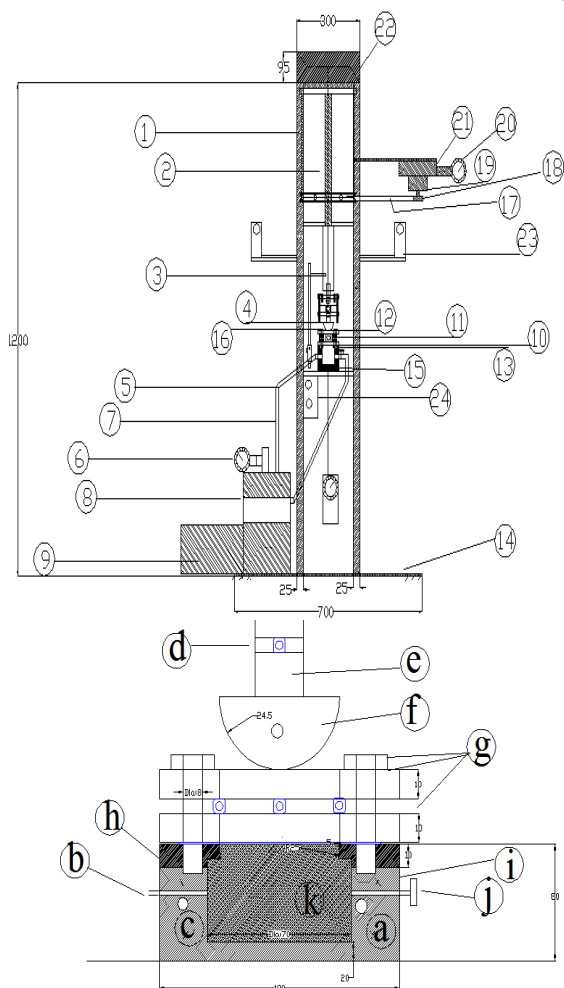
پارامترها	نتایج شبیه سازی	نتایج آزمایشگاهی	خطا
ضخامت ورق:			
۰/۳ میلیمتر			
نیروی ورق گیر:			
۶۰۰			
کیلوگرم نیرو			
فشار معکوس سیال:	۲/۳۹ تن	۳/۶ تن	۵/۸٪
۶۰۰ مگا پاسکال			
سرعت سمبه:			
۰/۵ ثانیه / میلیمتر			
عمق شکل دهی:			
۲۵ میلیمتر			

۵- مطالعات آزمایشگاهی و معتبرسازی

برنامه مطالعات آزمایشگاهی بدین شرح است که وقتی یک پارامتر مثلا نیروی ورق گیر تغییر می کند بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شوند تا بتوان اثر هر یک از پارامترها را بر نیروی کل شکل دهی و نحوه شکل گیری و سلامت محصول با یکدیگر مقایسه نمود. تمام اعداد و موارد بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی بوده و تحقیق به دنبال دستیابی به روشی است که بتوان حداقل آزمایش و خطا را به صنعتگر پیشنهاد داد. بدین ترتیب مثلا وقتی نیروی ورق گیر با ۵ مقدار تغییر می کند ضریب اصطکاک، سرعت سمبه و ... ثابت خواهند بود.

دستگاه برای فلزات و آلیاژهای مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته است مانند فولاد کم کربن، مس، برنج، آلومینیوم و به خصوص تیتانیوم خالص

هیدروفرم شده ارائه شده و برتری روش مذکور نسبت به روشهای سنتی به اثبات رسیده است.



پایه	۱
چک بیچی	۲
کولیس دیجیتالی جهت اندازه گیری طول کورس	۳
سنجه	۴
دماسنج	۵
فشارسنج دیجیتالی	۶
لوله هیدرولیک	۷
مخزن روغن	۸
موتور هیدرولیک	۹
قطعه کار	۱۰
سلول اندازه گیری نیرو، کرنش سنج	۱۱
ورق گیر	۱۲
قالب	۱۳
صفحه نشیمن کف دستگاه	۱۴
گرم کننده کار تریجی	۱۵
پنج اعمال کننده نیروی ورق گیر	۱۶
تسمه انتقال قدرت	۱۷
پولی (فرقره)	۱۸
جعبه دنده	۱۹
کنترل کننده سرعت	۲۰
موتور و صفحه تنظیم کننده	۲۱
باطری	۲۲
وسیله الکتریکی و مولتی متر	۲۳
استاندر	۲۴

شکل ۷ شماتیک دستگاه هیدروفرمینگ ورقه ای و طراحی مجموعه قالب (اندازه ها بر حسب میلیمتر)

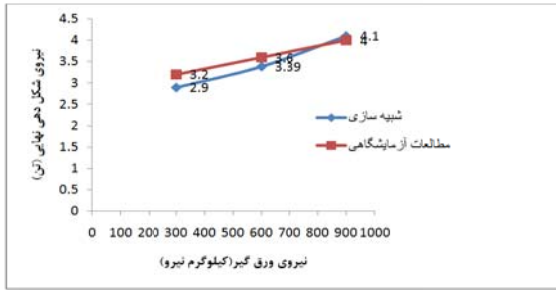
۳ با قطر ۱۰ میلیمتر بریده شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. البته این آزمایش در مورد قطعات از جنس مس، برنج، آلومینیم و تیتانیوم نیز انجام شده و سه ناحیه و همچنین قطعه ورق خام قبل از کشش به لحاظ ریزساختار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. روش تحلیل ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام گرفته است. محاسبه اندازه دانه با استفاده از روش شمارش تعداد نقاط برخورد با قطعه خط استاندارد ترسیم شده به دست آمده است [۱۲ و ۱۳].

شکل ۱۴- (۱) ورق های فلزی با نمونه های بریده شده و ۱۴- (۲) قطعه مسی با مناطق سه گانه جهت تحلیل ریزساختار را نشان می دهد. شکل ۱۵ تصاویر ریزساختار سه منطقه مذکور در محصول از جنس مس را نشان می دهد. همچنین اندیس ۴ به معنای ریز ساختار نمونه خام می باشد. ضخامت ورق یا نمونه خام آلومینیمی ۰/۴۱، مسی ۰/۲۹، برنج ۰/۳۵ و تیتانیومی ۰/۳ اندازه گیری شده است. به عنوان مثال ابعاد یا شعاع دانه ها بدین شرح زیر است: در مورد نمونه مسی اولیه ۳۳ میکرومتر و در بیشینه کشش ۳۵ میکرومتر اندازه گیری شده است. اما در کشش معمولی این عدد ۱۰ میکرومتر بوده که نشانگر ریزشدن غیر قابل کنترل دانه می باشد. میکرو مکانیزم برخورد مستقیم ورق بین سمبه سخت و قالب بدون وجود سیال امکان چنین موردی را فراهم نموده است. در مورد نمونه تیتانیومی قبل از کشش ۵ و بعد از آن ۶ میکرو متر بوده که این مشخصه عدم تغییر ناگهانی اندازه دانه بوده و آرامش و یکنواختی کشش را بیان می کند. تردی در چنین روشی کمتر اتفاق می افتد زیرا تغییر اندازه دانه به طور ناگهانی وجود ندارد.

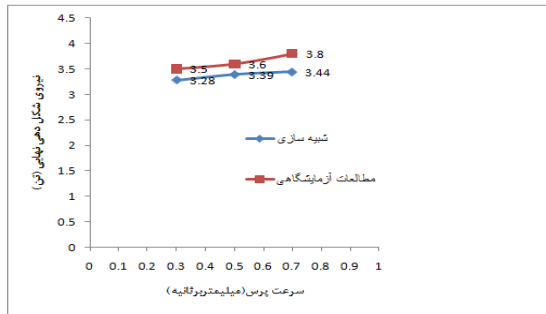
نکته مهم دیگری برای مقایسه نتایج قطعه هیدروفرم شده با محصول حاصل از غیر این روش انجام شده است. سه نقطه مشابه از نمونه با بیشترین حد کشش یا قسمت گمبندی شکل محصول مورد آزمایش ریزساختار قرار گرفته است. این موارد با اندیس های ۱-۳، ۲-۳ و ۳-۳ مشخص شده است. مشخص شد که طبق شکل های ۱۶ و ۱۷ روش هیدروفرمینگ به مراتب ساختار یکنواخت و همگن تری را نتیجه می دهد. عدم وجود ناهمسانی به معنای کرنش یکسان در قسمت های مختلف تحت کشش و در واقع عدم نازک شدگی یا یکنواختی ضخامت دیواره را گواه است و این یکی از مهم ترین برتریهای روش هیدروفرمینگ را نسبت به روشهای سنتی کشش اثبات می کند. در روش کشش معمولی نمایش داده شده در شکل ۱۷ عدم یکنواختی و همگن بودن در ریزساختار محصول مشخص بوده و این امر گواه توزیع کرنش متفاوت و یا تغییرات محسوس در ضخامت دیواره محصول است. همچنین ریز بودن بیش از حد دانه ها علی رغم بزرگنمایی مطلوب حاکی از به هم ریخته گی و عدم یکنواختی ریزساختار در حالت کشش معمولی می باشد. شکل های ۱۸ و ۱۹ نشانگر رفتار ریزساختار فلز تیتانیوم است. در شکل ۱۸ تیتانیوم در مراحل مختلف کشش با حالت خام خود به لحاظ ریزساختار مقایسه شده است. شکل ۱۹ نشانگر یکنواختی سه ناحیه یا نقطه بسیار کوچک در ناحیه ۳ یا بیشترین کشش می باشد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله فرایند هیدروفرمینگ ورقه ای به روش المان محدود شبیه سازی شده است. پارامترهای مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. یک دستگاه هیدروفرمینگ ورقه ای بر مبنای نتایج حاصل از شبیه سازی طراحی و ساخته شده است. دستگاه با انواع مختلف فلزات و آلیاژها مورد آزمایش قرار گرفته است. اعتبار مناسبی از مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی به طور خاص برای تیتانیوم به دست آمده است. در نهایت خصوصیات مواد محصولات

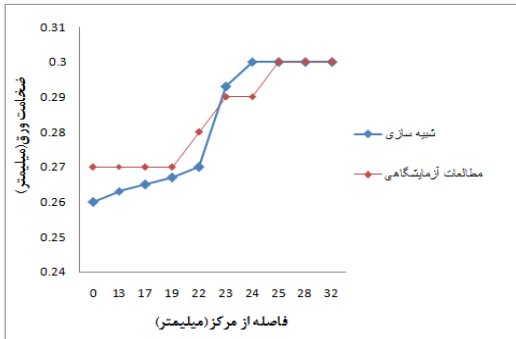


(۱)

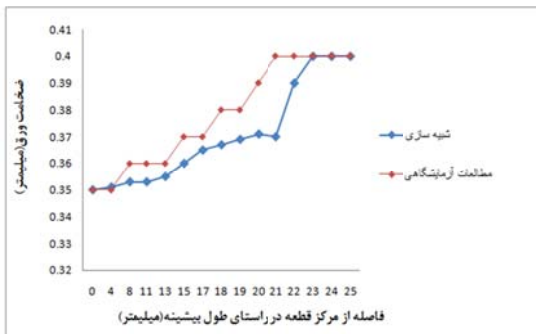


(۲)

شکل ۱۲ اثر نیروی ورق گیر (۱) و سرعت سمبه (۲) بر نیروی کل شکل دهی در حالت شبیه سازی و آزمایشگاهی برای قطعه متقارن



(۱)



(۲)

شکل ۱۳ توزیع ضخامت بر مبنای فاصله از مرکز ثقل در حالات شبیه سازی و آزمایشگاهی (۱) قطعه متقارن (۲) قطعه نامتقارن



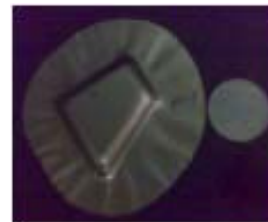
شکل ۸ دستگاه ساخته شده هیدروفورمینگ ورقه ای



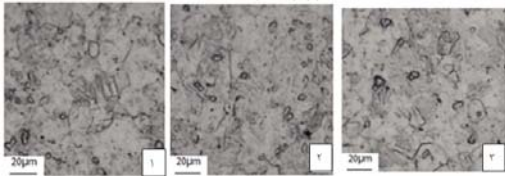
شکل ۹ محصولات از جنس تیتانیوم تولید شده توسط دستگاه



شکل ۱۰ قطعه متقارن تولید شده توسط دستگاه از جنس تیتانیوم با شرایط مطلوب



شکل ۱۱ قطعه نامتقارن تولید شده توسط دستگاه از جنس تیتانیوم با شرایط مطلوب



شکل ۱۹ تصاویر ریزساختار قطعه تیتانیومی هیدروفرم شده در ناحیه با بیشترین کشش؛ (۱): تیتانیوم ۱-۳، (۲): تیتانیوم ۲-۳، (۳): تیتانیوم ۳-۳



(۱)

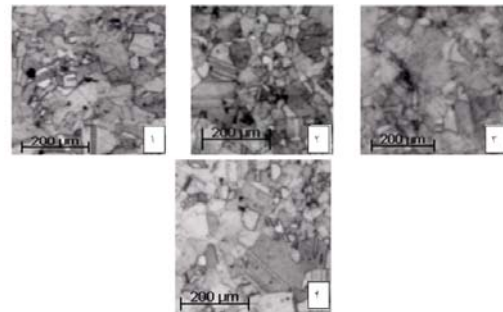


(۲)

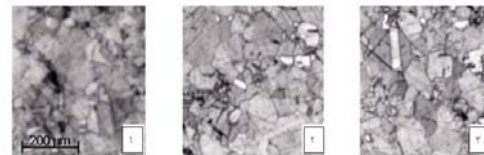
شکل ۱۴ (۱): ورق های فلزی با نمونه های بریده شده، (۲): قطعه مسی با مناطق سه گانه جهت تحلیل ریزساختار

۹- مراجع

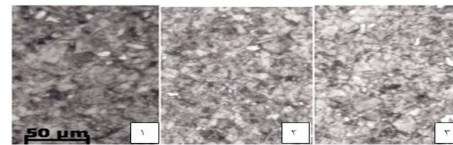
- [1] F. Forouhandeh, S. Kumar, S. N. Ojha, R. Balasubramanian, Recent development in micro hydroforming, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013, pp. 1-14, 2013.
- [2] M. Hosseinzadeh, H. Mostajeran, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, S. Norouzi, S. Hossainpour, Novel combined standard hydromechanical sheet hydroforming process, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 3, pp. 447-457, 2009.
- [3] S. Kumar, Report on DST Research project [IIIS (109)/2001-SERC (ENGG)] on Knowledge based automatic system for near-net shape manufactured products using extrusion, 2006.
- [4] S. H. Zhang, Developments in hydro forming. *Journal of Material Processing Engineering*, Vol.99, pp. 236-244, 1999.
- [5] S. Novotny and P. Hein, Hydroforming of sheet metal pairs from aluminum Alloys, *Journal of Material Processing Engineering*, Vol. 115, No. 1, pp. 65-69, 2001.
- [6] M. H. Hojjati, M. Zoorabadi, S. J. Hosseinpour, Optimization of superplastic hydroforming process of Aluminum alloy 5083. *Journal of Material Processing Engineering*, Vol. 205, No. (1-3), pp. 482-488, 2008.
- [7] N. Abedrabbo, M. A. Zampaloni, F. Pourboghrat, Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, No. 3, pp.333-358, 2005.
- [8] DEFORM-3D User's Manual, Version 10, Scientific Forming Technologies Corporation, 2009.
- [9] Titanium alloy guide, RMI Titanium Company, 2000.
- [10] K. Lange, *Hand Book of Metal Forming*, SME, Chapter 20, pp. 1-12, 1996.
- [11] A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, S. Nourouzi, S. J. Hosseinpour, G. Mohammad-Alinejad, Finite Element Simulation and Experimental Study of the Effect of Cone Parameter on Thickness Distribution in Hydroforming of Conical-Cylindrical Cups, *Advanced Materials Research*, Vol.189-193, pp. 2634-2637, 2011.
- [12] F. Forouhandeh, *Development of a sheet hydroforming process for metals and alloys*, Ph. D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology (Banaras Hindu University), Varanasi (UP) India, 2013.
- [13] E. E. Underwood, *Quantitative stereology*, Addison-Wesley Publishing Co., pp. 37-47, 1970.



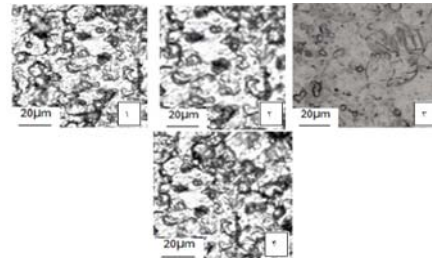
شکل ۱۵ تصاویر ریزساختار قطعه مسی هیدروفرم شده؛ (۱): مس-۱، (۲): مس-۲، (۳): مس-۳، (۴): مس-۴ حالت اولیه نمونه خام



شکل ۱۶ تصاویر ریزساختار قطعه مسی هیدروفرم شده در ناحیه با بیشترین کشش؛ (۱): مس-۱، (۲): مس-۲، (۳): مس-۳



شکل ۱۷ تصاویر ریزساختار قطعه مسی حاصل از روش معمولی کشش در ناحیه با بیشترین کشش؛ (۱): مس-۱، (۲): مس-۲، (۳): مس-۳



شکل ۱۸ تصاویر ریزساختار قطعه تیتانیومی هیدروفرم شده؛ (۱): تیتانیوم-۱، (۲): تیتانیوم-۲، (۳): تیتانیوم-۳، (۴): تیتانیوم حالت اولیه نمونه خام