نمونه سازي سريع با استفاده از انرژي قوس پلاسما با فرکانس پائين(SEDS)

سيد امين مير احمدي استاديار دانشکدة مهندسي مکانيک، دانشگاه علم و صنعت ايران
سيف ا... سعدالدين دانشجوي دکتري دانشکدة مهندسي مکانيک، دانشگاه علم و صنعت ايران
ياسر شانجاني دانشجوي کاشناسي ارشد دانشکدة مهندسي مکانيک، دانشگاه علم و صنعت ايران

چکيده

نمونه سازي سريع (Rapid Prototyping) با استفاده از انرژي قوس پلاسما يک روش نوين در ساخت سريع قطعه و قالب فلزي است. در اين روش انرژي حرارتي متمرکز مورد نياز از طريق ايجاد قوس پلاسماي حاصل از تخلية الکتريکي تامين مي گردد. مادة اولية مورد استفاده در اين روش پودر فلزي پوشش داده شده با مواد پليمري بوده و همبندي بين ذرات پودر به واسطة تفجوشي فاز مايع مواد پليمري صورت مي گيرد. توليد لايه هاي متوالي بر اساس هندسة مقطع هر لايه که در محيط CAD تعريف شده است، انجام مي شود. حرکت الکترود مولد قوس پلاسما نسبت به سطح مقطع هر لايه امکان تفجوشي اوليه يا همبندي انتخابي (selective binding) نقاط مختلف آن لايه را فراهم مي آورد. پس از تکميل توليد تمام لايه هاي يک قطعه، تفجوشي نهائي قطعه در داخل کوره انجام ميشود. سپس براي افزايش استحکام قطعه، عمل فلز خوراني (infiltration) صورت ميگيرد. قطعة توليد شده از اين روش شرايط لازم براي کاربرد عملي را دارا ميباشد. نمونه سازي سريع با انرژي قوس پلاسما، امکان ساخت سريع قطعات بزرگ فلزي را فراهم مي آورد.

کلمات کليدی: نمونه سازي سريع - همبندي - تف جوشي - فلز خوراني - قوس الکتريکي.

Rapid Prototyping with Low Frequency Selective Electrical Discharge Sintering (SEDS)

A. Mirahmadi, S. Saedodin and Y. Shanjani
Department of Mechanical Engineering of Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

Abstract

Rapid prototyping with Low Frequency Selective Electrical Discharge Sintering (SEDS) is a new method in manufacturing of parts and masters. In this method, an electrical plasma arc provides the required thermal energy for initial binding. A polymeric coated metal powder as raw material is used in SEDS and initial binding is constructed by liquid phase sintering. Sequential layers are manufactured according to their CAD models. A moving electrode scans entire of the surface and the generated thermal energy of the plasma arc is exerted to the particle powders in the selective points of the powder bed. After manufacturing of all of the layers, the green part is removed from the built-chamber of the SEDS system and is put in the appropriate furnace to complete the sintering process. Then for decreasing the porosity and increasing the strength of the part, the infiltration process is done. The manufactured part in the SEDS method is a functional part. The SEDS method has some valuable potentials which provide the manufacturing of the large parts and masters.

Key words: Rapid prototyping, Binding, Sintering, Infiltration, Electrical plasma arc.

۱- مقدمه

نمونه سازي سريع پاسخ مناسبي به كاهش زمان توليد و هزينة ساخت اولين نمونه از يك قطعة صنعتي است. در اكثر روشهاي موجود نمونهسازي سريع، قطعة نمونة توليد شده، يك قطعة نهايي نيست، بلكه به عنوان مدلي براي فرايندهاي ديگر توليد محسوب ميشود. قطعات صنعتي داراي پيچيدگيهاي مختلف سطحي و حجمي ميباشند. لذا با توجه به پيچيدگي موجود در قطعات، ساخت چند مدل يا نمونة اوليه در مراحل(R&D) و قبل از توليد نهايي يا توليد انبوه لازم ميباشد. زيرا فقط با تكيه بر نقشههاي اجرايي قطعات پيچيده نه تنها عمليات تست و آناليز كامل عملي نميباشد، بلكه درك كامل از جزئيات قطعه نيز مشكل خواهد بود. لذا طراحان ترجيح ميدهند كه طرح مورد نظر خود را به صورت يك نمونة واقعي سه بعدي مدل نموده و مشابه قطعة واقعي، تجزيه و تحليل لازم را انجام دهند. يك نمونة واقعي سه بعدي ميتواند در تجسم كامل و سه بعدي از ايدة اولية طرح، تائيد طراحي، قابليت تكرار ساخت، قابليت مونتاژ، بهينهسازي و كنترل اولية قطعه مورد استفاده قرار گيرد. همچنين ازمدل سه بعدي قطعه ميتوان در آزمايشهاي آئروديناميكي، سيالاتي، مدلهاي تونل باد، مدل اسپارك، مدل كپي تراشي، تست توزيع جرم و نسبت ابعادي استفاده كرد. بعلاوه وجود يك مدل سه بعدي در تدوين مراحل كنترل كيفيت و مونتاژ مؤثر بوده و در جلب رضايت مشتري در جهت بهبود طرح نقش مهمي را خواهد داشت. تحقق اين اهداف در حداقل زمان كه زمينه ساز ايجاد رقابت در دنياي صنعتي امروز است، از طريق نمونهسازي سريع امكان پذير خواهد بود. امروزه دامنة نمونهسازي سريع از توليد يك قطعه فراتر رفته و توليد سريع ابزار و قالب واقعي در رديف اهداف تحقيقاتي نمونه سازي سريع ميباشد.

۲- معرفي روشهاي مختلف نمونه سازي سريع

فرايند نمونه سازي سريع با ايجاد یک مدل سه بعدي در CAD آغاز شده و پس از تأييد مشخصه هاي گوناگون هندسي، ابعادي و دقت تلرانسي مدل، اطلاعات لايه هاي مختلف و متوالي قطعه با ضخامت معين توسط نرم افزار تهيه ميشود. ادامة كار توليد قطعه با استفاده از اين اطلاعات به شيوه هاي متعدد امكان پذير است. وجه اشتراک اكثر فناوري هاي نمونه سازي سريع، افزودن لايه هاي جديد بر روي لايه هاي قبلي ميباشد.

اتصال ذرات مجزاي پودر فلزات به يكديگر و ساخت قطعة يكپارچة فلزي از مدل سه بعدي شيوه اي است كه سالها در صنعت نمونه سازي سريع مورد توجه بوده است. روشهاي متعددي نيز براي نيل به اين هدف، چه به صورت تحقيقاتي و چه در بازار تجاري ارائه شده اند. از آن جمله ميتوان به سيستمهايي مانند تفجوشي انتخابي به وسيله ليزر (Selective Laser Sintering-SLS) و ساخت به وسيلة پرتو الكتروني (Electron Beam Manufacturing-EBM) اشاره كرد. در اغلب شيوه هاي ياد شده از پرتو ليزر، اشعة الكتروني و... به عنوان منابع انرژي متمركز براي بالا بردن دماي موضعي تا یک حد معين استفاده شده است. اين منابع انرژي متمركز با وجود دامنة گستردة كاربردشان، داراي معايبي هستند كه استفاده از آنها را محدود ميسازد. از آن جمله ميتوان به موارد زير اشاره كرد [۱]:

-راندمان كلي روش پرتوهاي ليزري و الكتروني پايين است.

-عمليات سطحي فلزات با روش پرتوهاي الكتروني بايد در محيط خلاء انجام شود.

-انتقال انرژي متمركز پرتو هاي الكتروني نيازمند سيستم كنترل پيچيدهاي است.

-تجهيزات مورد نياز روش پرتو الكتروني و ليزري گران قيمت هستند.

-به دليل توليد اشعة X در حين ماشينكاري با پرتو الكتروني، كنترل تجهيزات از راه دور امكانپذير است.

-هدايت و كنترل پرتو ليزر توليد شده، از منبع توليد تا محل انجام عمليات سطحي نيازمند سيستمهاي كنترل اپتيكي پيچيدهاي است.

-نور پرتو ليزر براي اپراتور اين نوع سيستم مضر است.

-اعمال پرتو ليزر بر روي سطح فلزات نياز به برخي عمليات آمادهسازي سطح مانند blacking دارد.

-بازتابش پرتو ليزر در برخورد به پودر فلزات زياد است [۲].

در شيوة نوين ارائه شده در اين مقاله، از قوس پلاسماي حاصل از تخلية الكتريكي به عنوان منبع انرژي متمركز استفاده شده است. اين تكنيک كه تفجوشي به كمک تخلية الكتريكي(Selective Electrical Discharge Sintering -SEDS)

ناميده ميشود، در مركز تحقيقات فرايندهاي توليد دانشگاه علم و صنعت ايران (MTC) ابداع و به ثبت رسيده است [۳].

۳- تشريح فرآيند SEDS

فرايند SEDS در دو بخش انجام ميشود. بخش اول شامل ايجاد استحكام خام (green strength) در قطعه است كه توسط تخليه انرژي الكتريكي در مرحله همبندي (binding) انجام ميشود و بخش دوم شامل مرحلة تفجوشي (sintering) و ايجاد استحكام نهايي به همراه عمليات فلزخوراني (infiltration) است كه در داخل كوره صورت ميپذيرد. در ادامة اين مقاله تمامي مراحل فرايند SEDS ارائه خواهد شد.

۳-۱- تهية پودر مناسب

انتخاب پودر فلزي مناسب از نظر جنس و اندازة ذرات، انتخاب یک همبند (binder) مناسب و نهايتاً پوشش دادن پودر فلزات با آن مسائل مهمي هستند كه در طي فرايند نمونهسازي سريع به كمك تخليه الكتريكي مورد تحقيق و بررسي قرار گرفتهاند.

بررسي روشهاي نمونهسازي سريع نشان ميدهد كه پودر فلزاتي چون Ni, Bronze, Stainless Steel, Fe و Cu به عنوان فلزات پايه مناسب هستند[۴-۶]. براي مثال پودر فلز استفاده شده توسط شركت EOS براي نمونهسازي سريع به روش SLS مطابق جدول ۱ ميباشد.

جدول ۱- تركيب پودر فلز مورد استفاده توسط شركت EOS

Phosphoric Cu (Cu 90%+Sn 10%)	Nicke	Bronze
75%	5%	20%

مواد پليمري مانند پلي آميد و موم پارافين، همبندهايي هستند كه در اين قبيل سيستمها مورد استفاده قرار گرفته اند [۶].

پوشش دادن ذرات پودر فلزي با همبند اين امكان را به وجود مي آورد كه براي اتصال هر یک از آنها به ديگر دانههاي فلزي، مادة همبند به ميزان كافي موجود باشد. اين امر استحكام يكنواختي را در تمام قطعه ايجاد خواهد كرد. بعلاوه وجود یک لايه از مادة آلي پليمري روي پودر فلزي، ضريب جذب تشعشع حرارتي آن را در مقابل پرتو انرژي هاي متمركز افزايش ميدهد [۷].

۳-۲- تغذيه وتراكم پودر

در روش SEDS مانند اغلب روشهاي نمونهسازي سريع، قطعات به صورت لايه به لايه ساخته ميشوند. لذا در هر مرحله ميبايست لايهاي از پودر به ضخامت مناسب بر روي لايههاي همبندي شدة قبلي اضافه شود. ضخامت هر یک از لايهها توسط اپراتور به هنگام ساخت مدل لايهاي در كامپيوتر تعيين ميشود. انتخاب مناسب و دقيق لايهها شرايط مناسب براي چسبيدن لايههاي متوالي به يكديگر را فراهم مي آورد. يكنواختي ضخامت لايهها و صافي سطح پودر اضافه شده موجب افزايش دقت و كيفيت توليد لايهها ميگردد. يكنواخت نبودن سطح پودر موجب انحراف مسير كانال قوس پلاسما و در نتيجه كاهش دقت در توليد لايه خواهد شد.

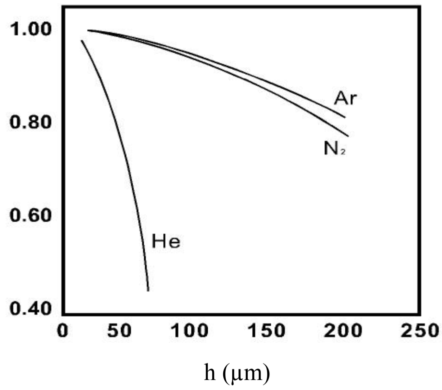
در مدل آزمايشي SEDS، پودر آماده شده در يك سيلندر كه قسمت تحتاني آن توسط يك پيستون مسدود شده است نگهداري ميشود. پيستون با حركت رو به بالا ميتواند ضخامت معيني از پودر را به بالاتر از لبة سيلندر برساند. به منظور كاهش انرژي حرارتي لازم در مرحلة همبندي، پودر تغذيه پيش گرم ميشود. پيستوني كه در قسمت ساخت قطعه قرار دارد به همان اندازة حركت پيستون اول، به سمت پايين حركت ميكند. مكانيزم انتقال، پودر را از قسمت تغذيه به قسمت ساخت منتقل نموده و سطح پودر در قسمت ساخت را به وسيلة عبور یک غلتک از روي آن تراز ميكند. مرحلة تراكم قبل از همبندي موجب كاهش تخلخل و افزايش چگالی ميشود. پس از تغذية پودر و تراز نمودن سطح آن در فضاي ساخت قطعه، عمل تراكم پودر انجام ميشود. اين مرحله را ميتوان به دو صورت تراكم توسط پرس و يا تراكم با ايجاد لرزش و ارتعاش انجام داد.

۳-۳- ايجاد شرايط اتمسفري مناسب

از آنجا كه مادة اولية اصلي مصرفي در اين شيوة نوين پودر فلزات ميباشد، لذا در دماي بالا كه لازمة ايجاد همبندي است، شرايط مناسب براي اكسايش مهيا مي شود. بنابراين ميبايست جوّي عاري از اكسيژن براي محوطة آن فراهم شود. تمام فلزات و آلياژهاي مصرفي براي نمونهسازي سريع در حضور اكسيژن لاية نازک پايداري از اكسيد تشكيل ميدهند. زيرا براي تمامي اكسيدها انرژي آزاد تشكيل ΔG° مقداري منفي است.

در سيستم هاي نمونهسازي سريع، پودر فلز در بهترين شرايط تنها به مدت چند ثانيه در دماهاي بالا قرار

خواهد گرفت كه سبب ميشود بر روي ذرات پودر فلز لاية اكسيد سستي تشكيل شود. براي جلوگيري از اكسيداسيون معمولاً از سه نوع گاز آرگون، نيتروژن و هليوم براي پر كردن فضاي اطراف جرقه ميتوان استفاده كرد. نتايج تجربي مطابق شكل ۱ نشان داده است كه استفاده از گاز آرگون موجب كسب راندمان بيشتر قوس الكتريكي نسبت به استفاده از دو گاز ديگر ميباشد. بنابراين در سيستم SEDS از گاز آرگون براي پر كردن فضاي اطراف جرقة الكتريكي استفاده شده است [۲].



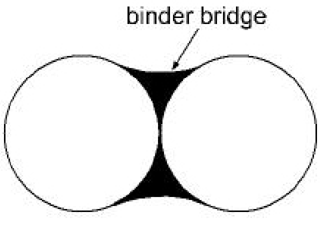
شكل ۱- راندمان تخلية الكتريكي در محيط گازهاي مختلف

در سيستمهاي مشابه نيز خلأ در حدود 10^{-6} torr همراه با گاز پركننده آرگون نتايج خوبي در توليد قطعات داشته است [۸].

۳-۴- همبندي با انرژي قوس پلاسما

نمونهسازي سريع از طريق ذوب و تفجوشي مستقيم فلزات كه غالباً داراي نقاط ذوب بالا هستند، نيازمند تجهيزات پيچيده و گران قيمت بوده و با اتلاف انرژي زيادي همراه است. یک راه حل مناسب در جهت غلبه بر اين مشكل، همبندي اولية ذرات فلز و دستيابي به قطعة با استحكامتر (green part) است كه امروزه به یک فناوری رايج در اين زمينه مبدل شده است.

در اين مرحله از فرايند نمونهسازي سريع، فقط مادة همبند به حالت مايع در آمده و ذرات پودر فلز را براساس مكانيزم تفجوشي فاز مايع (Liquid Phase Sintering -LPS) مطابق شكل ۲ به هم ميچسباند. در مرحلة تف جوشي نهايي قطعه كه در داخل كوره صورت ميگيرد، مادة همبند از ساختار قطعه خارج شده و سپس با انجام فرايند فلزخوراني، استحكام قطعه افزايش مييابد.



شكل ۲- اتصال ذرات در مرحلة همبندي

رساندن دماي موضعي مخلوط پودر تا حدود نقطة ذوب مادة همبند، نياز به يك منبع انرژي حرارتي متمركز دارد. قوس پلاسماي حاصل از تخلية الكتريكي بين الكترود و پودر فلز، منبع حرارتي متمركز روش SEDS ميباشد. انرژي حرارتي حاصل از قوس الكتريكي به حدي است كه در يك لحظة كوتاه ميتواند حرارت و دماي مورد نياز براي ذوب مادة همبند را تأمين كند. الكترود متحرک بر طبق مسير فرمان داده شده توسط كنترلر سيستم، سطح لايه را اسكن ميكند. در هر موقعيتي كه شناسنامة منطقي آن لايه فضاي پر را معرفي نمايد، جريان الكتريكي بر قرار شده و با تخلية الكتريكي بين الكترود و بستر پودر فشرده، انرژي حرارتي به ذرات پودر وارد و عمل همبندي و تشكيل گلويي اتصال بين آنها انجام ميشود. در موقعيتي كه شناسنامة منطقي آن لايه فضاي خالي را معرفي نمايد، قوس پلاسما قطع شده و آن قسمت از لايه به صورت پودر باقي ميماند. با انجام مراحل فوق توليد يك لايه از قطعه انجام شده است و مراحل مذكور براي توليد لايههاي بعدي يكي پس از ديگري انجام ميگردد.

۴- مكانيزم تامين انرژي حرارتي در روش SEDS

قوس پلاسما ميتواند دانسيتة انرژي بالايي را فراهم آورد. شدت انرژي قوس پلاسما حدود $1\times10^3 - 4\times10^3\,W/cm^2$ (شدت انرژي پرتو ليزر: $6\times10^3 - 15\times10^3\,W/cm^2$) است و در فرايندهاي متنوعي چون شكلدهي، جوشكاري، تفجوشي و... استفاده شده است. ميانگين نسبت انتقال انرژي پلاسما حدود۸۰% است در صورتيكه اين مقدار براي سيستم ليزري حدود ۱۰%- ۵ گزارش شده است. هزينة تجهيزات قوس پلاسما نسبتاً پايين است و تنها حدود ۱۰%- ۵ هزينة تجهيزات ليزر است. بعلاوه موقعيتهاي سطح فلز تاثير مهمي بر نسبت گرماي ورودي قوس پلاسما ندارد. كنترل عرض ناحية گرم شده توسط

قوس پلاسما مشکلتر از پرتو لیزر بوده و نیاز به تنظیم فاصلة محل تمرکز پرتو و نیز کنترل ضریب شکل (shape factor) دارد [۹].

۵- پروفیل توزيع انرژي در پرتوهاي انرژي متمرکز

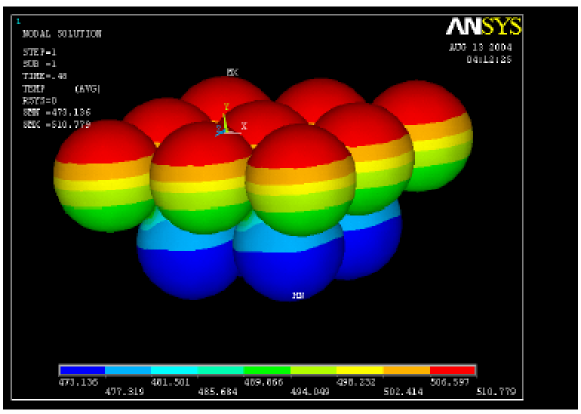
شار انرژي حرارتي ورودي به بستر پودر فشرده از طريق منابع انرژي متمرکز داراي توزيع هاي مختلفي است. غالباً پرتوهاي انرژي متمرکز داراي توزيع گوسين هستند که بيشترين مقدار شار حرارتي مربوط به مرکز پرتو است. معادلة (۱) توزيع گوسين شار حرارتي را نسبت به موقعيت مرکز پرتو نشان ميدهد[۱۰].

$$q_{in} = q_{\circ}(t)\cdot \exp\left[-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \quad q_{\circ}(t) = \frac{Q_{in}(t)}{\pi \cdot R^2} \qquad (۱)$$

$Q_{in}(t)$ کل انرژي منبع متمرکز انرژي و R شعاع پرتو است .

۶- مکانيزم انتقال انرژي حرارتي در داخل ذرات پودر کروي

با فرض اين که ذرات پودر فلزي کروي هستند، هنگام برقراري قوس الکتريکي بين الکترود و بستر پودر فشرده، نيمکره هاي فوقاني پودر در شرايط دريافت انرژي از طريق مکانيزم تشعشع حرارتي قرار ميگيرند. در حاليکه نيمکره هاي تحتاني در شرايط دريافت تشعشع حرارتي قرار ندارند. در شکل ۳ چيدمان منظم ذرات پودر کروي در کنار يکديگر نشان داده شده است.



شکل ۳- چيدمان منظم دانههاي پودر کروي

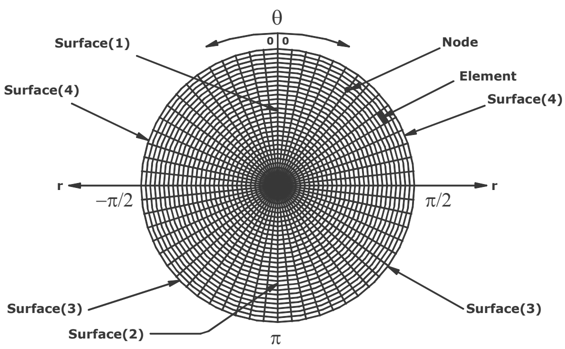
انتقال حرارت داخل هر يک از ذرات پودر کروي بر طبق معادلة (۲) صورت ميگيرد.

$$\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\cdot \sin\theta}\cdot \frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\cdot\frac{\partial T}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{r^2\cdot\sin^2\theta}\cdot\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\frac{\partial T}{\partial\varphi}\right)=\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۲)$$

به علت وجود تقارن در شرايط مرزي حرارتي در سيستم مختصات کروي، ترمهاي $\left(\frac{\partial}{\partial\varphi}\right)$ حذف شده و معادلة انتقال حرارت نهائي مطابق معادلة (۳) خواهد بود.

$$\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\cdot \sin\theta}\cdot \frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\cdot\frac{\partial T}{\partial\theta}\right)=\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۳)$$

شرايط مرزي براي هر يک از کره ها مطابق شکل ۴ عبارت است از:



شکل ۴- شبکه بندي و آناليز رفتار سطوح مختلف يک ذرة پودر کروي

در مرکز کره تقارن وجود دارد.

$$1)@r=0 \Rightarrow \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=0}=0 \qquad (۴)$$

$$2)@0<r\le R \ \ \& \ \ \theta=0 \ \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial\theta}=0 \qquad (۵)$$

$$3)@0<r\le R \ \ \& \ \ \theta=\pi \ \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial \theta}=0 \qquad (۶)$$

$$4)@ \ \ r=R \ \ , \ \ \frac{\pi}{2}<\theta\le\pi \Rightarrow q''_r=0 \qquad (۷)$$

بنابراين

$$\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r\,=\,R}=\mathbf{0} \qquad (۸)$$

با در نظر گرفتن تابع گوسين براي شار حرارتي ورودي، شرط مرزي در روي سطح نيمكرة فوقاني عبارتاست از:

$$5)@r=R \ \& \ \ 0\le\theta<\frac{\pi}{2} \ \ \Rightarrow -k\,\frac{\partial T}{\partial r}=q''_r \qquad (۹)$$

با توجه به توزيع گوسين:

$$@ \ \ r=R \Rightarrow -k\,\frac{\partial T}{\partial r}=q_{\circ}(t)\cdot\exp[-(\frac{R\cdot\sin\theta}{a})^2]\cdot\cos(\theta) \qquad (۱۰)$$

شرط اولية اين ميدان حرارتي عبارتاست از:

$$@ \ \ t\le 0 \ \ \Rightarrow T\,(r,\theta,0)=T_{\circ} \qquad (۱۱)$$

انتقال حرارت هدايت براساس معادلة (۳) و شرايط مرزي (۴-۱۰) و شرط اولية (۱۱) موجب ميشود كه دما در سطح خارجي دانه هاي كروي پودر افزايش يافته و موجب ايجاد گلويي بين ذرات در مرحلة همبندي از طريق مكانيزم LPS و مطابق شكل ۲ گردد.

۷- اثر پارامترهاي مؤثر بر راندمان جرقه در سيستم SEDS

راندمان انرژي متمركز در تخلية الكتريكي بالا بوده و در حدود ۸۰ درصد است. تغييرات راندمان در سيستم با تخلية الكتريكي تابع دو پارامتر اصلي و مهم فاصلة بين دو الكترود و نوع گاز موجود در فضاي بين دو الكترود است. كاهش فاصلة بين الكترودها باعث كاهش انرژي لازم براي يونيزاسيون، كاهش انرژي صرف شده براي گرم شدن گازهاي موجود بين دو الكترود و كاهش انرژي تلف شده از گازهاي داغ بين دو الكترود از طريق تشعشع به محيط اطراف ميشود. راندمان تخلية الكتريكي به صورت تابعي از فاصله و نوع گاز به صورت رابطة (۱۲) ميباشد [۱].

$$\eta=1-\left[2.10\left(\frac{m}{M}\right)^{0.75}\cdot\left(\frac{h}{\lambda}\right)^{0.5}\right] \qquad (۱۲)$$

η= راندمان

m = جرم الكترون

h = فاصلة بين دو الكترود

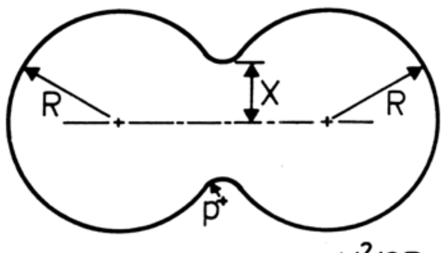
λ= فاصلة پويش آزاد الكترونها

M = جرم ذرات سنگين در فاصلة بين دو الكترود

در شكل ۱ راندمان روش تخلية الكتريكي براي محيط سه نوع گاز آرگون، نيتروژن و هليوم به صورت تابعي از فاصلة بين دو الكترود ارائه شده است. بيشترين راندمان مربوط به روش تخلية الكتريكي مرتبط با وضعيتي است كه گاز آرگون بين دو الكترود را پركرده باشد [۱].

۸- مراحل تكميلي (تف جوشي، فلزخوراني)

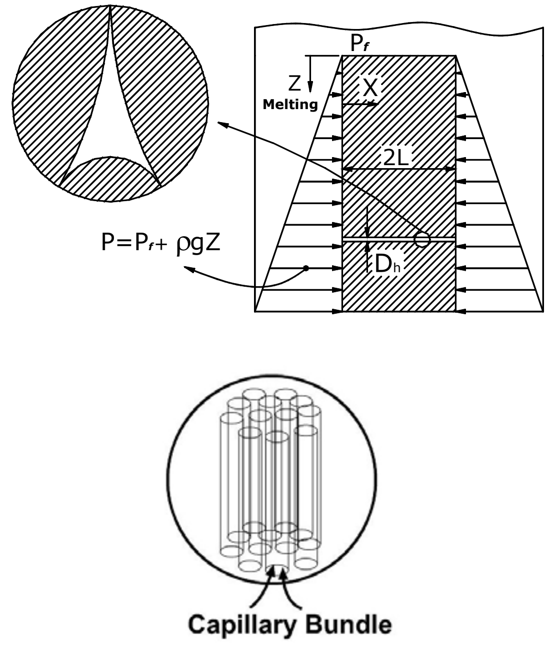
خارج كردن و جدا نمودن رزين يا پليمر همبند از قطعة توليد شده ميبايست در داخل كوره و در دماي بالا صورت پذيرد تا در آن دما مادة همبند سوخته و جدا شود. در برخي موارد مشابه، عمل جداسازي توسط حلال مادة همبند صورت ميگيرد. گذراندن اين شرايط دمايي بالا در كوره، شرايط را براي تفجوشي ذرات فلزي به يكديگر با رشد و تكميل گلوييهاي مابين آنها آماده ميكند. دماي لازم براي شرايط تفجوشي در حدود ۸۵% دماي نقطة ذوب فلز پايه تنظيم ميشود تا در طي يک فرايند زمان خواه، تفجوشي بين ذرات مطابق شكل ۵ صورت پذيرد.



شكل ۵- اتصال ذرات در مرحله تف جوشی

سپس براي دست يافتن به قطعهاي با چگالی بالا و با خواص مكانيكي مطلوب، فرايند فلزخوراني انجام ميشود. در اين فرايند، فلزي با دماي ذوب پايينتر از فلز پايه، منافذ قطعه را پر ميكند. اين كار را ميتوان با غوطهور نمودن قطعه در مذاب فلز دوم انجام

داد. در اغلب موارد ابتدا قطعه در پودر فلـز دوم غـوطهور شـده و سپس درون کوره قرار میگیرد. براي تـأمين هـدف، دمـاي كـوره بين دماي ذوب دو فلز تنظیم میشود. بدين ترتيب مذاب فلز دوم بـا نيـروي مـوييـنگي (capillary force) بـه درون منافـذ قطعـه كشيده شده، بخار داخل منافذ را جابجا كرده و آنها را پر ميكنـد. اين عمل به فلزخوراني (infiltration) معروف اسـت. در شـكل ۶ فرايند فلزخوراني به صورت طرحوارهاى نشان داده شده است.



شكل ۶- مدل مكانيزم جريان در مرحلة فلزخوراني

عمق نفوذ مذاب در محيط متخلخل فلزي كه به صورت لولههاي موئين مدلسازي ميشود، از طريق رابطة (۱۳) قابل محاسبه است [۲].

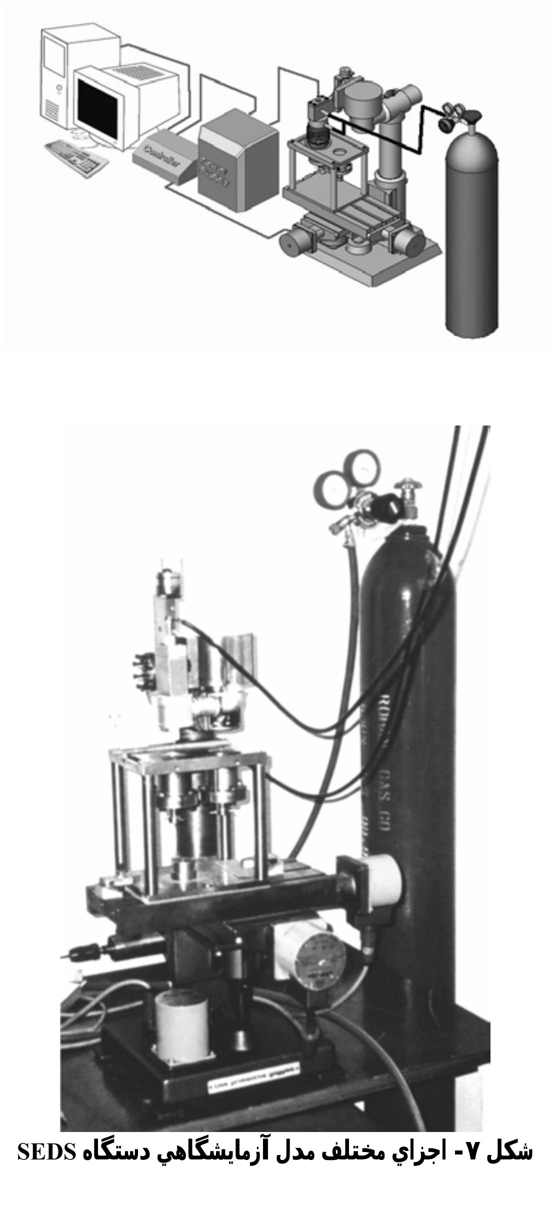
$$x = \left(\frac{r_{eff}\ .t.\gamma_{LV}\ .\cos\theta}{2\mu} \right) \qquad (۱۳)$$

كه در آن r_{eff} شعاع مؤثر منفذ، θ زاوية برخورد مايع و جامد، t زمان و μ ضريب گرانروي مايع است.

تمام عمليات ذكر شده در داخل كورة با اتمسفر نيتروژن و در دماي بالا صورت ميپذيرد. اين عمل ضمن جلوگيري از اكسيداسيون، موجب احيا شدن پودر فلزي كه احياناً قبلاً اكسيد شده است، نيز ميگردد.

۹- مراحل تجربي و آزمايشات عملي

در مـركز تحقيقات فن آوري توليد دانشگاه علم و صنعت ايران (MTC)، به منظور امكان سنجي و تست عملكرد SEDS، مدل آزمايشگاهي دستگاه SEDS، مطابق شكل ۷ ساخته شده است.



شكل ۷- اجزاي مختلف مدل آزمايشگاهي دستگاه SEDS

اين دستگاه از قسمتهاي مختلف ذيل تشكيل شده است.

فضاي نگهداري و تغذية پودر

سيستم تأمين، كنترل و تخلية انرژي الكتريكي

سيستم هدايت و كنترل مسير جرقه

سيستم كنترل اتمسفر فضاي ساخت

آزمايشهای متنوعي براي بررسي مسائل گوناگون و پارامترهاي مؤثر در فرايند SEDS، از قبيل نوع پودر فلز مصرفي، نوع مادة

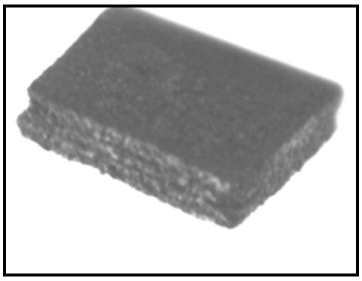
همبند، اندازة ذرات، جنس و مقطع الکترود، توان مصرفي و اتمسفر فضاي پلاسما تدوين و انجام شده است.

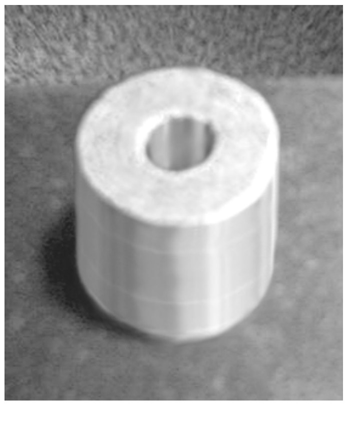
پودر مس، روي، قلع و آلياژ موليبدن با قطر ذرات کمتر از ۳۰۰ ميکرون، پودر فلزاتي هستند که در آزمايشها مورد استفاده قرار گرفتــه اند.

مواد پليمري مختلف مانند فنل فرمالدئيد، PVC و پليمر ABS براي پوشش دادن ذرات پودر فلزي مورد استفاده قرار گرفته و از بين آنها پليمر فنل فرمالدئيد به عنوان مادة همبند مناسب شناخته شده است. اين رزين در اثر حرارت حاصل از اعمال قوس الکتريکي موجب چسبيدن ذرات مجاور پودر فلزي به يکديگر ميگردد.

در آزمايشات انجام شده، مبدل ولتاژ ۵ کيلو ولت با توان ۲۰۰ وات براي تأمين انرژي حرارتي لازم مناسب بوده است.

با استفاده از سيستم SEDS تشريح شده و شرايط مذکور، قطعاتي از پودر فلز شکل گرفتــه اند که در شکل ۸ دو نمونه از قطعات توليد شده بعد از مرحلة همبندي و قبل از تفجوشي نشان داده شده است.





شکل ۸- دو نمونه از قطعات توليد شده توسط دستگاه SEDS بعد از مرحلة همبندي و قبل از تفجوشي

۱۰- نتيجه گيري

تــاکنون روشــهاي نمونــه ســازي ســريع مختلفــي معرفــي گرديــده اندکه هر يک با استفاده از مواد و شرايط خاصـي عمـل مينمايند. تکنيک SEDS به عنوان يک روش نمونه سازي سـريع در کنار ديگر روشهاي موجود ميتواند با استفاده از انرژي حاصـل از تخليــة الکتريــکي و پــودر فلزات پوشش داده شــده، مدل هاي طراحي شده در کامپيوتر را در طي فرايند توليد لايه اي، لايه بـه لايه توليد نمايد.

در ايـــن روش رانـــدمان انـــرژي مـــصرفي در مقايـــسه بـــا ديگـــر روشهاي نمونه سازي سريع بالا بوده و کنترل مسير اعمال انـرژي نيز نسبت بــه ســاير روشهاي شناخته شده ساده تــر ميباشــد. در اين روش ميتوان قطعة به دست آمده در پايان فرايند را مستقيماً به عنوان قطعة تکميلي و نهائي مورد استفاده قرار داد.

مراجع

[1] Edward D., Mikhail T., Formation of a High-Current Pulsed Gas Discharge as a Source of Highly Concentrated Energy Flux to Treat Metal Surfaces, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 21, No. 6, PP : 619-623, 1993.

[2] id Edward Bunnell., Fundamentals of selective Laser Sintering of Metals, The University of Texas, Austin, 1995.

[۳] ميراحمدي امين، سعدالدين سيف ا...، شانجاني ياسر، ۱۳۸۳، "گواهي ثبت اختراع - نمونه سازي سريع به کمک تخلية الکتريکي (SEDS)"، ادارة ثبت شرکتها و مالکيت صنعتي - ايران، شمارة ثبت اختراع ۲۹۷۹۸، تاريخ ثبت اختراع ۱۳۸۳/۳/۱۷.

[4] J. P. Kruth, L. Frogen, B. Morren, J.Bonse, Selective Laser Sintering of Wc-Co hard metal parts, K.U. Leuven division PMA, 1997.

[5] Y. P. Kathuria., Laser Assisted Rapid Prototyping for Direct Fabrication of Metallic Parts, Laser X Co. Ltd, Japan, 1997.

[6] Kruth, Van der Schneren. , Soft and Hand Rapid Tools for Polymer and Metal Casting / Molding.

[7] Sigel R., Howell J.R., Thermal Radiation Heat transfer, Hemisphere P.Co., MC Graw-Hill Book Company, 1981.

[8] Larry R. Jepson., Multi – Material selective laser Sintering. Empirical Studies and Hard Ware Development, the University of Texas, Austin, 2001.

[۹] مهدي مدبـريفر، "شـکل دهي انعطافپـذيــر ورق فلــزي بــا استفاده از قوس پلاسما"، مجلة قالبسازان، شمارة ۲۶.

[10] Moddy J. E., Hendel R, H., Temperature Profiles Induced by a Scanning CW Laser Beam, Journal of Applied Physics, 53(b), PP: 4364-437, 1982.