

# عایق الاستومری راکتها

## Elastomeric Insulator for Rockets

داود مجیدیان، غلامرضا بخشنده

مرکز تحقیقات مهندسی جهاد سازندگی - مرکز تحقیقات و توسعه علوم و تکنولوژی سواد  
پبیری

از افت فشار.

از این رو، پژوهشها به سمت ساخت عایقهایی جهت یافته است که با اتصال آنها به سطح آلیاژهای فلزی یا سایر سازه‌های موجود، ضمن محافظت از آنها باعث افزایش زیاد در وزن پرتابه نیز نشود.

### روشهای خنک سازی و محافظت پرتابه‌ها

هرچند فدا شوندگی عایق متداولترین روش برای خنک سازی و محافظت در برابر دماهای بالاست، ولی گاهی ضروری است که از روشهای دیگری استفاده شود. سطح عایقهایی فدا شونده در معرض حرارت زیاد و نیروهای برشی شروع به پس روی می‌کند. در برخی از حالتها این پس روی سطح، معادله‌های پیش بینی شده آئرو دینامیکی را برهم می‌زند و در نتیجه پرتابه مشخصات مورد نظر را نخواهد داشت. به همین جهت باید به گونه‌ای دیگر عمل کرد.

یکی از راهها استفاده از مدارهایی است که ظرفیت حرارتی زیاد و هدایت حرارتی بالا دارند. این مدارها از یک سو می‌توانند انرژی حرارتی ورودی را هرچه بیشتر جذب کنند و از سوی دیگر انرژی حرارتی دریافت شده را به گونه‌ای توزیع کنند که دمای سطح آن پایین باقی بماند [1]. خنک سازی بازتابشی (reradiation cooling) نیز می‌تواند روشی برای خنک کردن سیستمها باشد. در این روش از موادی استفاده می‌شود که دارای ظرفیت حرارتی تقریباً صفر بوده و سطح وسیعی داشته باشند تا بتوانند حرارت دریافتی را به مقدار زیادی به صورت تابش به محیط بازگردانند [2].

در مواردی که پس روی سطح در عایقهایی فدا شونده باعث برهم زدن معادله‌های آئرو دینامیکی پرواز می‌شود و همچنین در شرایطی که مقدار حرارت وارد شده به سیستمهای جذب کننده حرارت و بازتابشی به قدری بالا باشد که امکان استفاده از آنها از بین برود، روشهای خنک سازی دمشی و تراوشی (transpiration cooling) تنها راه

واژه‌های کلیدی:

عایق حرارتی، مواد فدا شونده، مکانیسم فدا شدن، موتور موشک، لاستیک نتریل

چکیده

در موتورهای موشک با سوخت جامد، سوخت به طور مستقیم با بدنه موتور در تماس قرار نمی‌گیرد زیرا حرارت زیادی که در اثر احتراق سوخت ایجاد می‌شود می‌تواند بدنه موتور را ذوب کند. برای رفع این مشکل از عایقهایی فدا شونده استفاده می‌شود که بین سوخت و بدنه موتور قرار می‌گیرد. جنس این عایقهایی حرارتی، الاستومر یا پلاستیک گرماسخت (thermoset) است که به همراه پرکننده استفاده می‌شوند. الاستومرهای تقویت شده از این جهت که هم دارای خواص حرارتی خوبی می‌باشند و هم قابلیت تغییر شکل برای تحمل و کنترل تنشهای حاصل از انقباض و انبساط را دارند برای حفاظت از بدنه موتور مناسب‌اند.

الاستومرهای عایق شونده اغلب دارای پایه EPDM, IIR, SBR, NBR و PU می‌باشند که پرکننده‌هایی از قبیل سیلیس، آزبست، تیتان اکسید و بوریک اسید آنها را تقویت می‌کنند.

در این مقاله ضمن بررسی عایقهایی الاستومری، عایق لاستیک نتریل معرفی می‌شود و طراحی ضخامت عایق و چگونگی کاربرد عایق داخل بدنه موتورهای موشک با سوخت جامد مورد بحث قرار می‌گیرد.

مقدمه

مواد عایق شونده در موتور، نازل و سرچنگی راکتها و موشکها نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این پرتابه‌ها از دو طرف در معرض گرمای شدید و کوتاه مدت هستند. گرما در سطح خارجی به دلیل اصطکاک شدید بین مولکولهای هوا و سیستم می‌باشد که این مسئله در نقطه سکون (stagnation point) بسیار بحرانی بوده و در سطح داخلی به دلیل احتراق سوخت است. در حین احتراق سوخت در محفظه موتور راکت و افزایش دما، جریان متلاطم بسیار شدید و فشار بالایی ایجاد می‌گردد که این عوامل می‌توانند باعث شکست قویترین و بهترین فلزات و آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت، مانند آهن، تیتان، تنگستن و غیره شوند. از این رو لازم است که از پرتابه‌ها در برابر این شرایط سخت محافظت به عمل آید تا بتوانند به اهداف و منظورهای مشخص دست یابند.

اهداف کلی کاربرد عایق داخل موتور راکتها عبارت‌اند از: جلوگیری از برخورد محصولات احتراق به بدنه موتور، انتقال تنشهای سوخت به بدنه، جلوگیری از سوختن سطوح ویژه‌ای از سوخت داخل بدنه که نباید بسوزند و آب‌بندی بدنه و اتصالات برای جلوگیری

Key Words:

thermal insulator, ablative materials, ablation mechanism, rocket motor, nitrile rubber

- غیر بلوری است و دمای انتقال شیشه‌ای آن پایینتر از دمای عملیاتی است.

الاستومرهای پر شده از این نظر برای عایق‌های داخلی مفیدند که هم خواص حرارتی خوبی دارند و هم به دلیل دارا بودن قابلیت کشش زیاد نمی‌گذارند فشار زیادی به پوسته موتور وارد گردد. از جمله الاستومرهای قابل استفاده برای ساخت عایق می‌توان از لاستیک استیرن بوتادی‌ان، بوتیل، اتیلن پروپیلن، پلی یورتان، سیلیکون و اکریلونیتریل بوتادی‌ان نام برد [5].

انتخاب لاستیک نیتریل به عنوان پایه الاستومری عایق

لاستیک NBR به دلایل زیر به عنوان جزء اصلی عایق فداشونده الاستومری مناسب است:

الف) قطبی بودن لاستیک NBR، باعث می‌شود که پرکننده‌های سیلیکاتی که قطبی هستند، به خوبی و آسانی در آمیزه لاستیک پخش شوند.

ب) چسبندگی و اتصال آن به سوخته‌های جامد نظیر پلی یورتان بالاست زیرا هردو قطبی می‌باشند.

ج) قابلیت زغال شدن NBR نسبت به الاستومرهای دیگر نیز بیشتر است. این مطلب توسط گیلمن (Gilman) و همکارانش ثابت شده است [5].

خصوصیاتی که از یک عایق خوب انتظار می‌رود عبارت‌اند از:

- ۱- زغال ایجاد شده پایداری خوبی داشته باشد.
- ۲- گازهایی که در اثر تجزیه مواد آن به وجود می‌آید دارای وزن مولکولی کمی باشد.
- ۳- چگالی پائینی داشته باشد.
- ۴- مقاومت حرارتی بالا و هدایت حرارتی پائینی داشته باشد.
- ۵- با سوخت سازگاری داشته باشد.
- ۶- نمگیر نباشد.
- ۷- به راحتی قالبگیری شود.

لاستیک نیتریل، NBR

NBR (acrylonitrile butadiene rubber) از پلیمر شدن کوپلیمر بوتادی‌ان - اکریلونیتریل حاصل می‌شود.

اصولا پلیمرهای نیتریل بخشی از محصولات هستند که به دلایل زیر اغلب از آنها به عنوان لاستیک‌های با اهداف ویژه یاد می‌شود. - قابل وولکانش هستند.

- کاربردهایی غیر از تایر و تیوب دارند.

- کارهای ویژه‌ای را انجام می‌دهند که از عهده لاستیک طبیعی و

SBR بر نمی‌آید.

عملی است که در پیش روی خواهیم داشت. در این روش از یک لایه محافظ متخلخل استفاده می‌شود که یک سیال خنک کننده از میان حفره‌ها و مجاری موجود در آن به لایه مرزی تریق می‌گردد. سیال حین عبور از لایه متخلخل مقداری از حرارت آن را می‌گیرد و بعد به سطح می‌رسد. پس از رسیدن به سطح به دلیل اختلاف دمای زیاد سطح و سیال پاد شده، این سیال مقدار زیادی از حرارت لایه مرزی را می‌گیرد و باعث کاهش زیاد ضریب انتقال حرارت می‌گردد. هلیم، آب و نیتروژن از جمله این سیالهای خنک کننده‌اند [3].

روش دیگر، خنک سازی با فداشوندگی (ablation cooling) است. عایق‌های فداشونده ابتدا با انجام تغییرات فازی مقداری از حرارت را جذب یا تلف می‌کنند و سپس با فدا کردن خود راه نفوذ حرارت را سد یا محدود می‌کنند که این از خصوصیات بارز و چشمگیر این مواد و علت اصلی انتخاب آنها به عنوان یک محافظ و سپر حرارتی ایده‌آل است.

کامپوزیت‌های لاستیکی به علت تحمل زیاد تنش‌های مکانیکی وارد شده و برخورداری از استحکام بالا، مشهورترین عایق‌های فدا شونده‌اند. به طور کلی عایق‌های فدا شونده به دودسته تقسیم می‌شوند:

دسته اول موادی هستند که در اثر حرارت واپلیم و تصعید می‌شوند و تقریباً باقیمانده‌ای ندارند. این مواد را عایق‌های فدا شونده زغال ناشونده (non-charring ablators) می‌گویند. عایق‌های فدا شونده تصعید شونده در اثر دریافت انرژی حرارتی زیاد واپلیم می‌شوند و مواد و گازهای حاصل از تغییر فاز جامد به گاز (تصعید) باعث ضخیمتر شدن لایه مرزی و خنک سازی بیشتر می‌گردد.

دسته دوم موادی می‌باشند که در اثر فدا شدن بقایای کربنی یا سیلیسی دارند و زغال از خود برجای می‌گذارند. این عایق‌ها را مواد کامپوزیتی یا مواد الاستومری پر شده تشکیل می‌دهند، مانند رزین فنولی، اپوکسی، اپوکسی نووالاک یا الاستومرهای NBR (اکریلونیتریل بوتادی‌ان)، SBR (استیرن بوتادی‌ان)، PU (پلی یورتان) و غیره. این مواد را عایق‌های فدا شونده زغال شونده (charring ablators) گویند که با پرکننده‌هایی همچون گرافیت، کربن، سیلیکا، کوارتز، شیشه، آزبست، بوریک اسید، تیتان اکسید و غیره تقویت می‌شوند [7].

عایق‌های الاستومری فداشونده

همان طور که اشاره شد بخشی از عایق‌های فداشونده را الاستومرها تشکیل می‌دهند.

یک ماده الاستومری دارای خواص زیر است:

- نسبتاً نرم است و خاصیت کشسانی دارد.

- تا حدود ۹۰۰ درصد در مقابل کشیدگی مقاومت می‌کند.

- پس از کشیدن به سرعت به حالت اولیه برمی‌گردد.

NBR بسته به درصد اکریلونیتریل آن که از ۱۸ تا ۵۰ درصد متغیر است، به شش پایه (grade) زیر تقسیم می‌شود:

- Very High Acrylonitrile
- High Acry.
- Medium High Acry.
- Medium Acry.
- Medium low Acry.
- Low Acry.

خواص این پلیمر مستقیماً در ارتباط با درصد اکریلونیتریل در محصول است، به طوری که با افزایش درصد اکریلونیتریل مقاومت در برابر روغن و سوخت، استحکام کششی، سختی، مقاومت سایشی، نفوذپذیری گاز و مقاومت حرارتی پلیمر زیاد می‌شود و مقاومت در دماهای پایین، انعطاف پذیری و خصلت پلاستیکی (plasticity) آن کاهش می‌یابد. لاستیک نیتریل در پایه‌های مختلف دارای وزن مولکولی متفاوت است. در وزن مولکولی حدود ۲۰,۰۰۰ تا ۹۰۰,۰۰۰ یک رابطه خطی بین لگاریتم ذاتی و لگاریتم وزن مولکولی در حلالهای مختلف وجود دارد.

لاستیک نیتریل در شکلهای فیزیکی مختلفی موجود است که عبارت‌اند از:

ورقه (sheet)، ذره (crumb)، پودر، باریکه (slab) و مایع (latex).

اثر حرارت بر NBR - اگر انتقال حرارت به NBR ملایم و کم باشد میزان تخریب لاستیک نیتریل خیلی کم است ولی اگر افزایش دما تا ۳۸۰°C ادامه پیدا کند تجزیه حرارتی شروع می‌شود و در ۴۳۰°C شعله‌ور می‌گردد.

نفوذ حرارتی NBR به درصد اکریلونیتریل بستگی ندارد. انبساط حرارتی آن تقریباً معادل انبساط حرارتی لاستیک طبیعی است. متوسط انبساط خطی در محدوده ۲۰ تا ۱۲۰°C برای NBR (با ۲۶ درصد اکریلونیتریل) برابر  $10^{-3} \times 130$  می‌باشد.

ترکیب NBR - بسیاری از ترکیبات لاستیک نیتریل برای دماهای بالا طراحی شده‌اند و در کل محصولات کم گوگرد یا محصولات وولکانیته با تترامیل تیورام دی سولفید (TMTD) بیشترین مقاومت را در برابر تخریب حرارتی دارند.

معمولاً NBR با گوگرد وولکانیته می‌شود. چون تعداد پیوندهای غیراشباع NBR نسبت به لاستیک طبیعی کمتر است به مقدار گوگرد کمتری نیاز دارد و معمولاً بجز در مواردی که لاستیک سخت و خشک مورد نظر باشد ۱ تا ۲ (part per hundred rubber) p.p.h.r گوگرد کافی است. لاستیکهای نیتریلی که درصد اکریلونیتریل آنها بیشتر است برای پخت مناسب به مقدار کمتری گوگرد نیاز دارند. مصرف گوگرد اضافی باعث پایین آمدن مقاومت پارگی و کم شدن ازدیاد طول

تا پارگی می‌گردد. می‌توان از مواد گوگرد دهنده مثل TMTD به جای گوگرد آزاد استفاده کرد [9, 8].

نمونه‌ای از خواص حرارتی و مکانیکی چند نوع عایق با پایه لاستیک نیتریل که از آزمایشهای انجام شده به دست آمده، در جدول ۱ ارائه شده است.

#### مکانیسم عمل عایق داخلی موتور

دانستن عملکرد عایق در انتخاب مواد و طراحی ضخامت عایق ضروری است. امروزه اغلب عایقهای موتورهای موشک با سوخت جامد به صورت سپر حرارتی براساس مکانیسم فداشدن (ablation) عمل می‌کنند. یعنی با افزایش دما، ماده حرارت را جذب کرده و حالت شیمیایی یا فیزیکی آن تغییر می‌کند. تغییرات معمولاً همراه با از بین رفتن سطح ماده است. عملکرد فداشدگی عایق، آن را به سه ناحیه تقسیم می‌کند:

۱- ناحیه دست نخورده،

۲- ناحیه تجزیه شده،

۳- ناحیه واکنش یا زغالی (char).

فصل مشترک این نواحی اغلب نامشخص است ولی با توجه به پدیده اصلی که در هر ناحیه رخ می‌دهد می‌توان آن را تعیین کرد. شکل ۱ مدل فداشدن عایق را نشان می‌دهد.

در ناحیه دست نخورده ماده، پدیده‌ای که روی می‌دهد نسبتاً ساده است. دما به اندازه کافی کم و تغییرات شیمیایی ماده ناچیز است و حرارت به طریق هدایت ساده منتقل می‌شود. در ناحیه تجزیه شده انرژی به وسیله تجزیه مولکولی جذب می‌شود. هر چه دمای ساده بالاتر رود واکنشهای تجزیه شدیدتر شده و باعث افت اساسی وزن پلیمر می‌شود. برخی پرکننده‌های غیرآلی نیز ممکن است تجزیه شوند و آب جذب شده از بین می‌رود. در ناحیه تجزیه شده دو نوع انتقال انرژی وجود دارد:

۱- انتقال به طریق هدایت،

۲- انتقال به وسیله پیرولیز و متعاقب آن اتلاف محصولات گرم احتراق.

هر چه دمای واکنش افزایش یابد درصد بیشتری از کل انرژی موجود در فرایند کلی فداشدن به وسیله کراکینگ و گرم شدن گازهای پیرولیز جذب می‌شود. مقدار جذب انرژی به اجزای شیمیایی مواد یاد شده و دمایی که واکنش در آن رخ می‌دهد بستگی دارد. به طور کلی تعداد کمی از واکنشهای تجزیه ممکن است گرماده باشند و قسمت عمده واکنشها گرماگیرند.

در ناحیه زغالی، پدیده مشابه ناحیه تجزیه شده است و تفاوت عمده در واکنشهای خاص می‌باشد. واکنش تجزیه، باقیمانده‌ای تولید می‌کند که به طور مداوم تجزیه می‌شود و باقیمانده نهایی عمدتاً کربن

عایق	استحکام کنشی (psi)	ازدیاد طول تا پارگی (%)	سرعت نفوذ شعله با دمای ۹۲۵°C در عایق (mm/sec)
عایق NBR با پرکننده سیلیس	۱۷۰۰-۲۱۰۰	۶۰۰-۷۰۰	۰/۴
عایق NBR با پرکننده آزبست	۶۲۰-۷۰۰	۲۸۰-۳۶۰	۰/۲۹
عایق NBR با پرکننده سیلیس و رزین فنولی	۱۷۰۰-۱۸۰۰	۲۸۰-۵۰۰	۰/۲۵
عایق NBR با پرکننده آزبست و رزین فنولی	۸۰۰-۹۵۰	۳۰۰-۳۷۰	۰/۲۴

- طراحی ولکانش عایق ،  
- طراحی فرایند ساخت ورقه عایق.

ب) طراحی ضخامت عایق.

طراحی آمیزه عایق - آمیزه کاری لاستیک هنر و دانش انتخاب و ترکیب الاستومرها و مواد افزودنی است به طوری که مخلوط مناسبی به دست آید تا خواص فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز را برای یک محصول نهایی به وجود آورد.

عنصری (elemental) است. تجزیه اجزای غیر آلی و کراکینگ گازهای پیرولیز نیز از ویژگیهای این ناحیه است.

کراکینگ گازهای پیرولیز کم دما منجر به تراکم کربن در ناحیه زغال (char) می شود که اثر کک شدن نامیده می شود. فشار ایستاء سرعت جریان جرمی، ترکیب درصد گاز پیرولیز و سرعت افزایش دما همگی در ناحیه زغالی با زمان تغییر می کنند. هر چه زمان تماس عایق با شرایط داخل موتور افزایش یابد سطح عایق ساییده تر می شود. عبارت پس روی سطح (surface regression) برای شرح کامل اثر انواع مختلف اتلاف سطح به کار می رود. آثار اتلافهای سطح عبارت اند از:

۱- آثار شیمیایی:

الف) واکنشهای شیمیایی سطحی اجزای لایه زغال با گازهای سوخت و ذرات (معمولا مایع)،  
ب) واکنشهای زیر سطح (معمولا پیرولیز) در ناحیه زغالی و تجزیه شده.

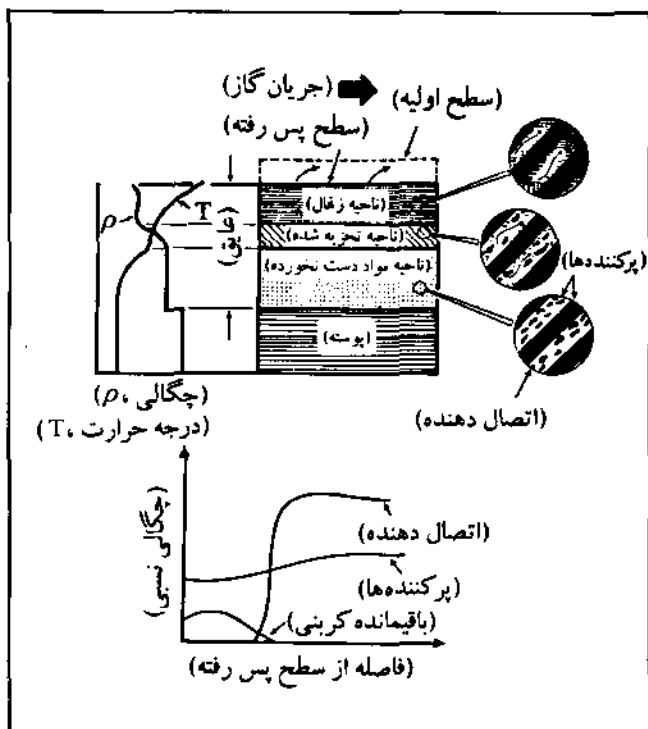
۲- آثار فیزیکی:

الف) فرسایش سطحی مربوط به برخورد ذرات و تنش برشی ناشی از اصطکاک سطح،  
ب) تنش حرارتی ناشی از انتقال حرارت،

ج) ضعیف شدن سطح زیرین ناشی از تنشهای حرارتی و مکانیکی در لایه زغال و ناحیه تجزیه شده، مثلا خرد شدن به علت فشار داخلی ایجاد شده به وسیله گاز پیرولیز.

۳- ترکیبی از آثار شیمیایی و فیزیکی.

شکل ۲ سطح مقطع سه نوع عایق را پس از عملکرد نشان می دهد.



شکل ۱ - مدل فدا شدن عایق [5].

اهداف آمیزه کاری لاستیک عبارت اند از:

۱- رسیدن به خواص معینی در محصول نهایی، به طوری که جوابگوی نیازها باشند.

طراحی عایق الاستومری و ضخامت آن

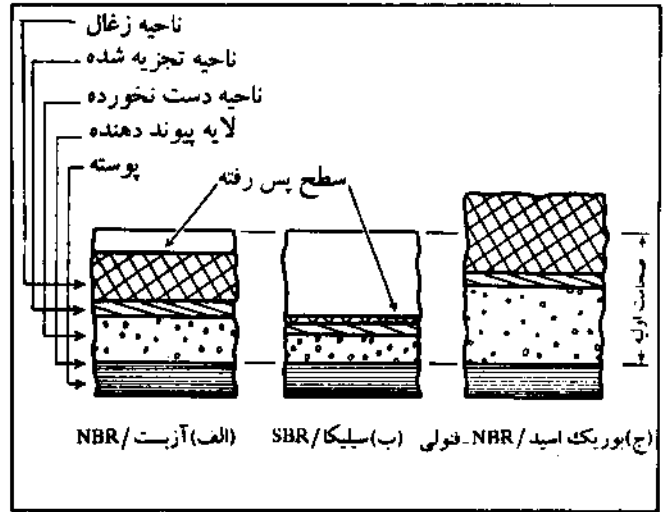
اصولا برای داشتن عایقی مناسب در شرایط موتور راکتها، دو نوع طراحی باید صورت گیرد:

الف) طراحی عایق شامل:

- طراحی آمیزه عایق،

۲- دستیابی به خصوصیات فرایند مورد نیاز جهت به کارگیری مؤثر ماشین آلات و تجهیزات موجود، به عبارت دیگر مهمترین معیار در آمیزه کاری، ایجاد موازنه قابل قبول بین نیازهایی است که از این سه هدف مشخصه حاصل می‌گردند.

- ساختن یک نمونه محصول از آمیزه مورد نظر،  
- آزمایش محصول نمونه در مقابل ویژگیهای عملکرد آن.  
طراحی فرایند ساخت ورقه عایق - برای تهیه آمیزه لاستیک و شکل دادن به آن فرایندهایی به شرح زیر انجام می‌گیرد:



شکل ۲- سطح مقطع سه نوع عایق مختلف پس از فداشدن [5].

مواد آمیزه کاری را می‌توان به صورت زیر طبقه بندی کرد [6]:

- ۱- الاستومرها،
- ۲- عوامل وولکانش،
- ۳- شتاب دهنده‌ها،
- ۴- فعال کننده‌ها و تأخیر اندازها،
- ۵- ضد تخریبها، ضد اکسندها، ضد ازناتها، مومهای حفاظتی،
- ۶- تسهیل کننده‌های فرایند،
- ۷- پرکننده‌ها (دوده - مواد غیر دوده)،
- ۸- نرم کننده‌ها،
- ۹- رنگ دانه‌ها،
- ۱۰- موادی که برای اهداف ویژه به کار می‌روند.

روش مؤثر برای طراحی آمیزه می‌تواند شامل مراحل زیر باشد [6]:

- تعیین اهدافی مشخص (خواص، نحوه کاربرد، قیمت و غیره)،
- انتخاب الاستومر پایه،
- مطالعه اطلاعات و نتایج آزمون مربوط به آمیزه‌های موجود،
- بررسی فرمولها و اطلاعات مربوط به خواص آمیزه‌هایی که از جانب فروشندگان مواد ارائه می‌شود،
- انتخاب یک فرمول برای شروع کار،
- طراحی آمیزه‌هایی برای رسیدن به اهداف مورد نظر،
- برآورد قیمت آمیزه انتخابی برای ارزیابی بعدی،
- ارزیابی فرایند پذیری آمیزه در عمل،

الف) فرایند اختلاط که شامل سه فرایند همزمان است که عبارت‌اند از: اختلاط ساده، اختلاط لایه‌ای و اختلاط پراکنشی. اهمیت نسبی هر یک از این فرایندها بستگی به فرمولبندی خاص آمیزه، شکل هندسی مخلوط کن و همچنین شرایط فرایند و پردازش دارد. در یک حالت خاص هر یک از این سه فرایند ممکن است راندمان و کارایی کل فرایند را تعیین کند. به طور کلی، عمل اختلاط در مورد الاستومرها توسط غلتک (Roll mill)، بن بوری (Banbury) یا هردو انجام می‌گیرد.

ب) ورقه سازی توسط غلتک که عبارت از فشردن آمیزه بین غلتکهاست که به منظور صاف کردن یا نازک کردن آن به شکل ورقه انجام می‌گیرد. در این عملیات اساسی از یک کلندر با دو یا سه غلتک عمودی یا افقی استفاده می‌شود. خوراک ورودی به شکل نوار یا به صورت توده لاستیکی به یک طرف از گیرانداز (nip) وارد شده و پس از صاف و مسطح شدن به صورت یک ورقه که توسط دست یا وسایل مکانیکی دیگر کشیده می‌شود، در می‌آید.

طراحی وولکانش عایق - وولکانش فرایندی برگشت ناپذیر است که طی آن ساختمان مولکولی یک آمیزه لاستیکی در اثر تشکیل پیوندهای عرضی از یک ماده گرمانرم (thermoplastic) به یک ماده گرماسخت (thermoset) که خواص کشسانی بهتری دارد تبدیل می‌شود. فرایند وولکانش طبق معادله آرنیوس صورت می‌گیرد:

$$\text{Log } K = [(-E)/(2/3 \cdot 2.303 RT)] + C$$

که در این معادله K، ثابت سرعت واکنش، E انرژی فعالسازی، R ثابت گازها، T دمای مطلق و C عدد ثابت است.

این معادله کلا بیان می‌کند که هرچه میزان حرارت (یا انرژی) بیشتر باشد واکنش وولکانش سریعتر اتفاق می‌افتد. از آنجا که در تمام روشهای رایج وولکانش از انرژی حرارتی استفاده می‌شود لذا می‌توان چنین اظهار داشت که هرچه دمای وولکانش بالاتر باشد، فرایند سریعتر کامل می‌گردد.

اصولا برای محاسبه زمان پخت یک الاستومر با فرمولبندی خاص، رثوگراف (Rheograph) آن را توسط دستگاه رثومتر (Rheometer) رسم می‌کنند [6].

روشهای پخت عایق - یکی از مراحل مهم در فرایند عایقکاری بدنه‌های موشک پخت عایق است. با توجه به شرایط موجود دو شیوه کلی برای پخت در نظر گرفته می‌شود:

الف) پخت عایق به صورت ورقه‌های لاستیکی قبل از چسباندن آن داخل بدنه موتور.

در این روش پس از ساخت ورقه عایق، آن را توسط پرسهای فشاری با قالبهایی که ابعاد مناسب داشته باشند پخت می‌کنند. چنانچه به ورقه‌های لاستیکی بزرگی نیاز باشد می‌توان پس از تهیه آمیزه و شکل دهی اولیه آن، ورقه‌های لاستیکی را توسط پخت کننده چرخان (Rotocure) پخت کرد. در این روش ورقه لاستیکی پخت نشده از بین غلتکهای داغ عبور می‌کند و پخت می‌شود.

ب) پخت عایق پس از قرار گرفتن آن داخل بدنه موتور. در این روش نیز با طراحی فرمولبندی آمیزه لاستیکی تهیه می‌شود و به شکل ورقه‌هایی با ضخامت مناسب در می‌آید. این ورقه‌ها پس از اینکه به ابعاد مناسب بریده شدند و روی دیواره داخلی بدنه موتور قرار گرفتند به یکی از روشهای زیر پخت می‌شوند:

۱- پخت در اتوکلاو،

۲- پخت به طریقی که خود بدنه به عنوان ظرف پخت (یعنی اتوکلاو) عمل کند،

۳- پخت خود به خود در دمای محیط.

طراحی ضخامت عایق - ضخامت عایق باید برای موارد زیر مناسب باشد:

۱- حفاظت بدنه در برابر خطر گرم شدن بیشتر از حد مجاز در مرحله آتش،

۲- در صورت لزوم، جلوگیری از تشعشع گرمایی به اجزای موتور. طراحی ضخامت عایق نه تنها باید شامل از بین رفتن ماده عایق در اثر فرسایش، بلکه شامل یک لایه از ماده برای جلوگیری از نفوذ حرارت به پشت سطح عایق که فرسوده شده است نیز باشد تا بدنه بیش از حد گرم نشود. مبنای محاسبه مقدار عایق لازم برای این سپر حرارتی، حد دمای دیواره است و ضخامت مورد نیاز، از تجزیه و تحلیل تغییرات آماری، اطلاعات عملکرد عایق محاسبه می‌شود. پس از اینکه مقدار عایق لازم برای فرسایش و نفوذ حرارتی تعیین شد، ضریب اطمینان مناسبی برای آن در نظر گرفته می‌شود. برای مواد عایق که به خوبی شناخته شده هستند و برای سرعت جریانهای داخلی موتور که زیاد یا نامتقارن نیستند معمولاً، ضریب اطمینان ۲۵ تا ۵۰ درصد و برای موادی که خوب شناخته شده نیستند و سرعت جریانهای زیاد، ضریب اطمینان ۱۰۰ درصد یا بیشتر پیشنهاد می‌شود. در موتورهای کوچک (به قطر کمتر از ۳۰ اینچ) که حداکثر حجم مفید مورد نیاز است، برای مواد مشخص ۱۰ تا ۲۰ درصد ضریب اطمینان و برای موادی که خوب مشخص نیستند ۵۰ درصد ضریب اطمینان کافی است. ضخامت عایق مورد نیاز به یکی از روشهای زیر تعیین می‌شود:

الف) آنالیز  $Q^*$ : وقتی ماده عایق در دمای بالا تشکیل زغال نمی‌دهد، ضخامت عایق باید براساس روش  $Q^*$  محاسبه شود. از جمله این مواد

SBR و NBR هستند که سرعت فداشدن برای آنها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$X_a^{\circ} = \frac{q_{total}^{\circ}}{Q} \quad (1)$$

که در این رابطه شار حرارتی ( $q^{\circ}$ ) برحسب  $Btu/ft^2 \cdot sec$ ، گرمای مؤثر فداشدن ( $Q^{\circ}$ ) برحسب  $Btu/lb_m$  و چگالی ( $\rho$ ) برحسب  $lb_m/ft^3$  است. مقدار  $Q^{\circ}$  باید از اطلاعات قبلی موجود باشد یا به طور تجربی به دست آید.

ضخامت فداشده حاصل ضرب سرعت فداشدن و زمان تماس است. بنابراین:

$$X_a = X_a^{\circ} t \quad (2)$$

که ضخامت فداشده ( $X_a$ ) برحسب in، سرعت فداشدن ( $X_a^{\circ}$ ) برحسب in/sec و زمان تماس (t) برحسب ثانیه (sec) می‌باشد.

وقتی  $q_{total}^{\circ}$  به طور عمده تغییر کند، زمان تماس به فواصل زمانی شکسته  $q_{total}^{\circ}$  متوسط برای هر فاصله زمانی به کار می‌رود.  $q_{total}^{\circ}$  ضخامت عایق اضافی مورد نیاز برای جلوگیری از سوختن بدنه، طی مرحله عمل موتور، باید به روش آنالیز انتقال حرارت حالت ناپایا (unsteady-state) محاسبه شود.

ب) تصحیح سرعت فرسایش و زغال شدن عایق: هنگامی که عایق در دماهای بالا تشکیل زغال می‌دهد و در مواردی که ضخامت عایق باید به طور دقیق مشخص باشد، این ضخامت براساس این روش باید تنها در محدوده متغیرهای عملیاتی که اطلاعات مربوط برای تصحیح کافی است، انجام شود و برون یابی (extrapolation) درست نیست. وقتی شرایط عملیاتی، مثل اندازه موتور یا ترکیب سوخت با شرایط مبنای تصحیح فرق کند، اطلاعات اضافی مورد نیاز است. تنها در مورد اطلاعاتی که در محدوده مطمئن واقع می‌شوند، باید تصحیح انجام گیرد. برای زمان تماس عایق (t) در یک وضعیت مشخص، متوسط سرعت زغال شدن را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$(X_{ch}^{\circ})_{ave} = \frac{\int_0^t X_{ch}^{\circ} dt}{t} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $X_{ch}^{\circ}$  سرعت زغال شدن است و برای نشان دادن شرایط فرسایش نیز به کار می‌رود. قدیمی‌ترین رابطه برای پیدا کردن  $X_{ch}^{\circ}$  به صورت زیر است:

$$X_{ch}^{\circ} = C_1 \cdot P^a \cdot T_{c1}^b \cdot V^c \quad (4)$$

که در آن سرعت زغال شدن ( $X_{ch}^{\circ}$ ) برحسب in/sec، فشار کل (P) برحسب psi، دمای توده گاز/ذرات،  $T_{c1}$ ، سرعت موضعی گاز/ذرات (V) برحسب ft/sec،  $C_1$ ، a، b، c و ثابتهای تجربی مربوط به اطلاعات سرعت زغال شدن هستند. چنین روابطی برای یک ماده عایق خاص تعیین می‌شوند و برای مواد مشابه تنها  $C_1$  تغییر می‌کند.

با به دست آمدن اطلاعات بیشتر، تصحیحات کاملتر شده و سرعت زغال شدن به متغیرهای بیشتری که در پدیده پیچیده فداشدن

طراحی شود، تصحیح شده باشد [5].

### نتیجه گیری

عایق الاستومری بدنه موشکها، کاربرد خاصی از لاستیکهاست و بسته به نوع استفاده‌ای که از لاستیک می‌شود برخی از خواص آن اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. بنابراین، عایق باید طوری طراحی شود که این گونه خواص در حد مطلوب جوابگوی نیازها باشند.

عایق بدنه موشکها در معرض حرارت و تنش بالایی قرار دارد و همچنین اتصال آن به بدنه موشک از اهمیت خاصی برخوردار است. عایق الاستومری باید بتواند بدنه راکت را از دمای بالای شعله محافظت و تنشهای ناشی از انقباض و انبساط راکت در سوخت و بدنه به وجود می‌آید، کنترل کند و خلاصه عایق باید به خوبی به بدنه بچسبد تا در اثر نیروهای وارد شده از آن جدا نشود. بنابراین، خواص حرارتی، مکانیکی و چسبندگی این عایق در درجه بالایی از اهمیت قرار دارند.

با انتخاب مواد، فرمولبندی و فرایند مناسب می‌توان خواص یاد شده را در عایق تقویت نموده و در جهت کنترل بهتر راکت گام برداشت.

(این مقاله نتیجه تحقیقات مشترک مرکز تحقیقات مهندسی جهاد سازندگی و مرکز تحقیقات و توسعه علوم و تکنولوژی مواد پلیمری است.)



- [1] Sutton, G.W. , Journal of Aeronautic Science 24(11), 1957.
- [2] Hurwitz ;H., Kratsch K ;and , Rogan J.E. ;AGARD-AG-161 , on Ablation ,NATO ,1972.
- [3] Rohsenow ,Warren M. ,Hartnett James P. ,Handbook of Heat Transfer ,Copyright 1973 ,by Mc Graw-Hill Inc.
- [4] Nitrile-Butadiene Rubber in Ablative Application General Type 2 Rubber Co. ,by Daly & Hartz & Meyer & Sommer ,1974.
- [5] Solid Rocket Motor Internal Insulation (NASA) ,1976.
- [6] Basic Compounding and Processing of Rubber ,by Harry Long.
- [7] Ablative Materials ,Encyclopedia of Composite Materials and Components ,by Matin Grayson.
- [8] Encyclopedia of Chemical Technology. ,by Kirk Othmer.
- [9] Chemical Technology. ,by Morton ,1978.
- [10] Polym. Symp. 1974 ,25 ,261-74 (Nitrile-Butadiene Rubber in Ablative Applications) ,1974.
- [11] Filled Composition Containing Phenol-Aldehyde Resin and

مؤثرند مربوط شده‌اند. از آنجا که اهمیت نسبی متغیرهای مختلف که بر سرعت زغال شدن مؤثرند، شناخته شده نیست و مدلهای دقیق ریاضی برای ارزیابی کمی تمام متغیرها وجود ندارد، آنالیز ابعادی برای نشان دادن متغیرهای مهم مورد استفاده قرار گرفته است. این متغیرها مربوط به سرعت جریان گاز / ذرات در مجاورت سطح عایق، خواص انتقالی گاز، شکل هندسی موتور، خواص حرارتی عایق و تشعشع گرمایی است. این روابط پیچیده با استفاده از گروههای بی بعد در معادله زیر بیان شده‌اند:

$$Lu = C_p Re \cdot Fo^b \cdot Bi^c \cdot \left(\frac{r}{X_i}\right)^d \cdot E_{eff} \cdot \left(\frac{X_i}{X_{c1}}\right)^e \quad (5)$$

در این رابطه داریم:

$$Lu = \text{Luikov number} = \frac{r X_{c1}^0}{X_i}$$

$$Re = \text{Reynolds number} = \frac{\rho U r}{\mu}$$

$$Fo = \text{Fourier number} = \frac{X_i t}{r^2}$$

$$Bi = \text{Biot number} = \frac{h r}{K_i}$$

که در آن  $r$  شعاع داخلی محفظه در یک وضعیت مشخص  $X_{i1}$  ضخامت عایق  $h$  ضریب کلی انتقال حرارت از گاز خروجی به عایق  $t$  زمان  $\mu$  گرانیوی مطلق  $X_{i1}$  نفوذ حرارتی عایق  $X_{c1}$  نفوذ حرارتی توده ابری گاز / ذره  $C_p, b, c, d, e, f$  و ثابتهای تجربی و  $E$  ضریب انتشار (Emissivity) می‌باشد.

برای به دست آوردن حداکثر اطمینان در این روابط معمولاً اطلاعات زغال شدن و فرسایش از چندین موتور با ابعاد، شرایط عملیاتی و ترکیب سوختهای مختلف به دست می‌آید و اطلاعات اغلب مربوط به بیش از یک نوع ماده عایق است. ابعاد موتورهایی که از آنها اطلاعات گرفته می‌شود محدود و وسیعی دارد که از موتور کوچک (حدود  $10 \text{ lb}_m$  سوخت) تا بزرگ (بیشتر از  $40,000 \text{ lb}_m$  سوخت) را در برمی‌گیرد. شرایط عملیاتی از فشار کم (تقریباً  $20 \text{ psi}$ )، سرعت جریان کم محصولات احتراق (تقریباً  $20 \text{ ft/sec}$ )، زمان تماس کم (چند ثانیه) تا فشارهای بالا ( $1000 \text{ psi}$ )، سرعت جریانهای زیاد (بیشتر از  $3000 \text{ ft/sec} = 1 \text{ مایخ}$ ) و زمانهای تماس طولانی (بیشتر از  $100$  ثانیه) می‌باشند.

ج) آنالیز فداشدن (ablation): محاسبه ضخامت عایق نباید از ابتدا براساس آنالیز فداشدن باشد. آنالیز تفاضل محدود فداشدن برای اطمینان از آنالیز انجام شده به روش  $Q^*$  یا تصحیحات سرعت فرسایش و زغال شدن پیشنهاد می‌شود. اگر چه این روش به علت آنالیز جزء به جزء گرما و فرسایش و همچنین برون یابی نتایج آزمون، روش مفیدی است ولی بسیار نظری می‌باشد و در طراحی عایق تنها وقتی به کار می‌رود که روش، با نتایج آزمون بر روی یک موتور مشابه که باید

ژان بابتیست آندره دوما (۱۸۰۰ - ۱۸۸۴) شیمیدان فرانسوی در زمینه شیمی آلی مطالعه داشت و نظریه "توع" ساختار آلی را توسعه داد.

ژان بابتیست دوما در ۱۴ ژوئیه ۱۸۰۰ در الیس (Alais) متولد شد. در جوانی در یک داروسازی شاگردی می‌کرد. در ۱۸۱۶ به ژنو رفت و در آزمایشگاه رویر به مطالعه شیمی فیزیولوژی پرداخت. دوما در ژنو الکساندر فون هامبولت، دانشمند مشهور را ملاقات کرد و این دانشمند دوما را تشویق کرد تا به پاریس برود، زیرا در آنجا فرصتهای علمی بیشتری به دست می‌آورد. وی در ۱۸۲۳ به پاریس رفت و به عنوان کمک مدرس شیمی در دانشکده پلی تکنیک استخدام و در ۱۸۳۵ استاد شیمی شد. دوما در این دوره کار روی کتاب اصلی خود به نام "شرحی بر شیمی" را شروع کرد و همچنین در بنیاد نهادن مدرسه مرکزی هنر و صنایع دستی همکاری کرد.

دوما در ۱۸۳۰ نظریه دوگانگی معروف یان یاکوب برزیوس شیمیدان بزرگ سوئدی را رد کرد. بنابراین نظریه، تمام ترکیبات را می‌توان به قسمتهای مثبت و منفی تقسیم کرد.

دوما به جای آن نظریه‌ای واحد ارائه داد مبنی بر اینکه اتمهای با بارهای مخالف را می‌توان در ترکیبات جایگزین کرد بدون اینکه تغییر زیادی در خواص اصلی ترکیب ایجاد کنند. این نظریه مربوط به عقیده وی در مورد خانواده‌های ترکیبات آلی بود، که در آنها می‌توان استخلافهایی انجام داد و خصلتهای بنیادی خانواده را بدون تغییر حفظ کرد. در این زمان برزیوس در اوج شهرت خود بود و هیچ گونه بی حرمتی را نمی‌پذیرفت، و به دلیل حمله شدید وی به دوما بود که دوما دنبال این مجادله را نگرفت. پژوهشهای بعدی ثابت کرد که نظریه‌های دوما از دانشمند سوئدی صحیحتر بوده است.

دوما از قطران زغال سنگ روغن‌ها و عصاره‌های مختلفی به دست آورد و روشی برای اندازه‌گیری مقدار نیتروژن در ترکیبات آلی ابداع کرد که امکان تجزیه کمی آلی را فراهم کرد و روش تازه‌ای برای تعیین چگالی بخار ارائه داد. وی همچنین در مورد تعیین وزن اتمی عناصری مانند کربن و اکسیژن مطالعه کرد و در سالهای ۱۸۵۸ تا ۱۸۶۰ فهرست جدیدی از وزن ۳۰ عنصر ارائه داد.

دوما علاوه بر دستاوردهای علمی، در دوران سلطنت ناپلئون سوم زندگی اجتماعی فعالی داشت. وی وزیر کشاورزی و بازرگانی و سپس وزیر آموزش و پرورش شد. وی همچنین سناتور، رئیس فرهنگستان فرانسه و سرپرست انجمن شهر پاریس بود. فعالیت اجتماعی وی با سقوط امپراطوری دوم در ۱۸۷۱ پایان یافت. دوما در ۱۸۸۴ در پاریس درگذشت.

Encyclopedia of World Biography (1973)

Vol:3

Butadiene-Acrylonitrile Polymer, by Rndolph J. Danowaki, Oxford, Conn, Jan, 15, 1980.

[12] Heat-Curable Mixture of Butadiene-Acrylonitrile Copolymers and Phenol-Aldehyde Resins and Method of Making, by Charles F. Fisk, Clifton, N.J.

آستر لاستیکی - از انتشارات بخش تحقیقات شرکت لاستیک [13] سهند.

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر - سال سوم، شماره سوم - [14] از انتشارات مرکز تحقیقات و توسعه علوم و تکنولوژی مواد پلیمری.

### Kuzminskii

### کازمینسکی

استاد کازمینسکی (۱۹۹۰ - ۱۹۱۰) اولین شخص در روسیه و یکی از نخستین افراد در جهان است که مسئله افزایش پایداری پلیمر، فراورش کارکرد و ذخیره آن را مطرح کرده است. مطالعات کازمینسکی و دانشمندان مدرسه‌ای که وی بنیاد نهاد از ۱۹۴۰ در جهت بررسی فرایندهای اکسایشی الاستومری در دماهای بالا، روشهای محافظت از پیر شدن الاستومر، انتقال شیمیایی - مکانیکی پلیمرها در طول فرایند و پیری، متمرکز شد. با راهنمایی وی روش پیشگویی خواص لاستیک توسط پیری شتاب یافته توسعه یافت.

بخش عمده کار پژوهشی کازمینسکی وقف مطالعه فرسودگی تابشی لاستیک، سیتیک اکسایش آغاز شده با تابش دهی یون کننده و رفتار بازندارندگی در طول این فرایند ویژه شد، در نتیجه آن اصول فرمولبندی ترکیب لاستیکهای مقاوم در برابر تابش ابداع شد.

در سالهای آخر عمر، ترکیبات لاستیکی - الیگومری و لاستیکهای مایع زمینه‌های علمی جالب توجه کازمینسکی و همکارانش را تشکیل داد. مطالعات علمی در این زمینه‌ها، امکان ابداع مواد لاستیکی با خواص بی نظیر و توسعه اساس فیزیکی - شیمیایی تولید کالاهایی بر پایه لاستیکهای مایع با گروههای عاملی متفاوت را به وجود آورد.

به دلیل سهم بزرگی که وی در زمینه پیشرفت شیمی فیزیک الاستومرها داشت، جایزه الکسی - بش به وی اعطا شد.

استاد کازمینسکی بیش از ۴۰۰ مقاله علمی شامل ۷ تک نگاره و ۲۰ مقاله مروری مربوط به روندهای اصلی زمینه‌های علمی خود منتشر کرده است. ۴۰ تن از دانشجویانش درجات علمی دریافت کرده‌اند. به دلیل روشن بینی وی و با راهنماییهایش، مؤسسه علمی پایداری مواد پلیمری در کانتون چین بنا شد.

وی در ۱۵ فوریه ۱۹۹۰ درگذشت، در حالی که انجمن علمی بین المللی، کمکهای کازمینسکی به جهان علم را به یاد خواهد داشت.

Polym. - Plast. Technol. Eng.

29(4), 417(1990)