

پوشش‌های سد حرارتی

Thermal Barrier Coatings

پوشش‌هایی که با کاهش انتقال گرما از گاز داغ به سطح فلز زیرلایه، عمر زیرلایه را افزایش می‌دهند.

گسترش جمعیت و افزایش تقاضای مصرف انرژی، شرایطی را به وجود آورده است که پژوهشگران اکثر علوم به سمت تولید و توسعه محصولات با مصرف سوخت و هزینه پایین و درمقابل طول عمر بیشتر، سوق پیدا کنند. از جمله مهم‌ترین این موارد توربین‌های گازی و موتورهای جت هستند که به‌طور گسترده، در صنایع مختلف و از جمله صنایع تولید انرژی کاربرد دارند [۱]. بنابراین هرگونه پیشرفت در بهینه‌سازی که منجر به کاهش مصرف سوخت و افزایش بازدهی آنها شود، منجر به صرفه جویی اقتصادی خواهد شد. استفاده از پوشش‌های سد حرارتی، یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش بازدهی در توربین‌های گازی، موتورهای جت و خودروهای دیزلی است [۲].

تاریخچه

پوشش‌های سد حرارتی نسبتاً ضخیم (۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) و از جنس مواد سرامیکی و مقاوم به حرارت هستند که از زیرلایه فلزی در برابر دماهای بسیار زیاد محافظت می‌کنند [۳]. در داغ‌ترین مناطق موتور توربین‌های گازی، امکان استفاده از این پوشش‌ها فراهم است. در چنین محیطی، هدایت حرارتی کم این پوشش، موجب کاهش دما در گذر از پوشش سد حرارتی می‌شود.

پوشش سد حرارتی، دمای زیرلایه را کاهش می‌دهد و موجب کاهش مصرف سوخت، افزایش قدرت موتور، طول عمر و پایداری اجزا در موتورهای احتراق و به‌طور کلی، افزایش راندمان در هر بخش مورد استفاده می‌شود [۴].

از سال ۱۹۶۰م تاکنون سرامیک‌های بسیاری برای پوشش‌های سد حرارتی آزمایش شده‌اند. از جمله Ca_2SiO_4 ، ZrTiO_4 ، ZrSiO_4 ، CaTiO_3 ، MgAl_2O_3 و مولایت که همه این مواد به سرعت رد شدند. در اوایل سال ۱۹۶۰م در ناسا و مرکز تحقیقات نیروی هوایی آمریکا، طرح استفاده از پوشش‌های سد حرارتی شکل گرفت [۵]. سرامیک پیشنهادهی ناسا اکسید زیرکونیوم (زیرکونیا) پایدار شده بود.

این ماده دارای بالاترین ضریب انبساط حرارتی برابر با $(11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$ در 1000 درجه سلسیوس در بین سرامیک‌های اکسیدی معمول (به جز MgO) است که در مقایسه با متوسط ضریب انبساط حرارتی سوپر آلیاژهای پایه نیکل، که معمولاً به‌عنوان زیرلایه مورد استفاده قرار می‌گیرند، $(17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$ بیشترین نزدیکی را دارد [۶].

انواع

به‌طور معمول پوشش‌های سد حرارتی سیستم‌های چندلایه ای هستند که شامل یک لایه رویی سرامیکی و لایه پوشش میانی فلزی هستند که بین لایه رویی سرامیکی و فلز زمینه قرار می‌گیرد. نمای این نوع از پوشش‌ها در شکل ۱ آورده شده است.

لایه سرامیکی
لایه فلزی
زیرلایه

شکل ۱. یک نوع پوشش سد حرارتی

در دماهای بالا، لایه اکسیدی نازکی در فصل مشترک پوشش میانی و پوشش سرامیکی تشکیل می‌شود. پوشش‌های سد حرارتی دمای زیرلایه را تا 170 درجه سلسیوس کاهش می‌دهند [۷].

در کاربردهای سد حرارتی، امروزه همچنان متداول‌ترین مواد و انواع آن، اکسید آلومینا، اکسید آلومینا-اکسید زیرکونیوم پایدار شده با ایتیریم است. برای افزایش بازدهی توربین‌های گازی و موتورهای جت، از این ماده به‌مثابه ماده عایق حرارت استفاده می‌شود؛ همچنین از پوشش‌های MCrAlY برای افزایش چسبندگی لایه سرامیکی به زیرلایه و جلوگیری از خوردگی داغ و اکسیداسیون دمای بالای زیرلایه به‌عنوان لایه میانی استفاده می‌شود. M در این پوشش‌ها نماینده عناصری مانند آهن، نیکل و کبالت یا ترکیبی از آنها است. حضور آلومینیوم (Al) و کروم (Cr) در ترکیب این پوشش‌ها، به‌علت تشکیل لایه اکسیدی بسیار

چسبنده و مقاومی است که از خوردگی و اکسیداسیون بیشتر پوشش جلوگیری می‌کند وجود ایتریا (Y) نیز به چسبندگی بیشتر پوشش اکسیدی به سطح پوشش کمک می‌کند [۶].

روش‌های پوشش‌دهی

پوشش‌های سد حرارتی با روش‌هایی ایجاد می‌شوند که توانایی اعمال انرژی کافی برای ذوب یا تبخیر ماده اولیه را داشته باشند. از جمله روش‌هایی که توانایی تولید این انرژی بالا را دارند، می‌توان پاشیدن پلاسما در اتمسفر هوا، رسوب فیزیکی از مرحله بخار به کمک پرتوی الکترونی (Electron beam physical deposition (EB-PVD))، پاشیدن حرارتی با سوخت اکسیژن و سرعت بالا (High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) coating) سل-ژل و رسوب شیمیایی از مرحله بخار را نام برد [۸]. از میان این روش‌ها، دو روش پاشیدن پلاسما می‌تواند براساس پدیده پلاسما و رسوب فیزیکی از مرحله بخار که براساس قدرت و سرعت پرتوی الکترونی انرژی لازم را برای ذوب و تبخیر تولید می‌کنند، بیشتر در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوشش‌های سرامیکی ایجاد شده به روش رسوب فیزیکی بخار با باریکه الکترونی دارای ساختار ستونی هستند، درحالی که پوشش‌های تولید شده به روش پاشیدن پلاسما، ساختار هم‌محور و لایه‌لایه دارند. ساختار ستونی در شرایط اعمال تنش‌های کششی شدید، با باز شدن از هم مانع پوسته شدن لایه سرامیکی می‌شوند و باعث تحمل بالای پوشش در برابر کرنش‌های شدید و مقاومت بالا در برابر شوک‌های حرارتی می‌شوند [۹]. همچنین پوشش‌های رسوب فیزیکی بخار با باریکه الکترونی دارای مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی بهتری نسبت به پوشش‌های پاشش پلاسما هستند. همین علل باعث افزایش عمر پوشش‌های سد حرارتی تولید شده به روش رسوب فیزیکی بخار با باریکه الکترونی نسبت به پوشش‌های سد حرارتی پاشش پلاسما می‌شود [۶].

پوشش‌های سد حرارتی مدرن

به‌طور کلی به‌علت صرفه اقتصادی روش پاشیدن پلاسما بیشترین کاربرد را در بین همه روش‌های تولید پوشش‌های

سد حرارتی دارد. در این روش، قابلیت اسپری تقریباً هر نوع ماده‌ای وجود دارد. مواد پوششی از طریق سیستم تغذیه پودر و به کمک گاز حامل که اغلب همان گاز اولیه سیستم است، به درون شعله تزریق می‌شود. هرچند به‌واسطه سرعت زیاد گاز، زمان قرارگیری مواد در شعله، بسیار پایین است ولی دمای بسیار زیاد شعله، سبب می‌شود تا در این زمان کوتاه، ذرات پودر به‌صورت مذاب درآیند و به‌سمت زیرلایه شتاب بگیرند [۱۰]. تنها درصد کمی از این ذرات، به‌صورت جامد و یا نیمه‌مذاب وارد پوشش می‌شوند که با تغییر پارامترهای فرایند و مواد اولیه، این درصد را می‌توان تا حد بسیار پایینی کاهش داد [۱۱]. قطرات مذاب در اثر برخورد به سطح زیرلایه، به‌واسطه انرژی جنبشی بالایی که دارند بر سطح زیرلایه پهن می‌شوند و بلافاصله در اثر انتقال گرما به زیرلایه و محیط اطراف، سرد و منجمد می‌شوند که این ذرات پهن شده همان اسپلت‌ها هستند که نقش مهمی در خواص پوشش‌های ایجاد شده بازی می‌کنند [۱۲].

نکته اصلی در انتخاب هر سیستم پوششی، تعیین این مسئله است که آیا این سیستم پوششی، به اندازه کافی می‌تواند از زیرلایه در برابر شرایط محیطی یا به‌طور کلی ساز و کارهای تخریب حفاظت کند. مدل‌های تخریب عادی، برای پوشش‌های سد حرارتی شامل موارد: خستگی ترمومکانیکی در چرخه پایین، خستگی در چرخه بالا، اکسیداسیون دما بالا، خوردگی داغ، شوک‌های حرارتی و خزش است [۱۳].

برای افزایش دمای کاری و افزایش طول عمر این نوع از مواد (پوشش‌ها) و به تأخیر انداختن ساز و کارهای تخریب حرارتی است که به این نوع از پوشش‌های سد حرارتی پوشش‌های سد حرارتی مدرن گفته می‌شود. معمولاً پوشش‌های سد حرارتی جدید یا مدرن را به سه دسته تقسیم‌بندی می‌کنند [۱۴]:

پوشش‌هایی با مواد جدید،

پوشش‌های با ساختار جدید،

پوشش‌های نانو ساختار.

پوشش‌های سد حرارتی

تجربی موجود در زمینه خواص مکانیکی، حاکی از پتانسیل بالای بهبود این خواص با کاهش اندازه ذرات است [۱۸]. پوشش‌های نانو مقاومت سایشی بسیار بهتری دارند. این در حالی است که در موارد دیگری، مشخص شده که نانو پوشش‌های YSZ (زیرکونیای پایدار شده با ایتریا) نسبت به پوشش‌های متداول سختی بیشتر و مقاومت سایشی بهتری دارند. نتایج این بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که نانو پوشش‌های پاشیده حرارتی شده در مقایسه با پوشش‌های متداول، مقاومت در برابر اشاعه ترک یا چقرمگی نسبی بالاتری دارند. با توجه به چقرمگی نسبی بالاتر پوشش‌های نانو ساختار مقاومت سایشی بالاتر این نوع از پوشش‌ها، نسبت به پوشش‌های متداول، حتی در حالتی که سختی پایین‌تر یا یکسان است، به مقاومت بالاتر آنها در برابر اشاعه ترک نسبت داده شده است [۱۹].

مداخل مرتبط

مواد در انرژی؛ مواد در سامانه‌های ترابری.

کتاب‌شناسی

- [1] Xiong, H.; et al. "Experimental study on heat insulation performance of functionally graded metal / ceramic coatings and their fracture behavior at high surface temperatures". *Surface and Coating Technology*, vol. 194, 2005.
- [2] Svakumari, R.; et al. "On the development of the plasma-sprayed thermal barrier coatings". *Oxidation of Metal*, vol. 20, no. 3/4, 1983.
- [3] Viswanathan, V.; et al. "Engineered multilayer thermal barrier coatings for enhanced durability and functional performance". *American Ceramic Society*, vol. 97, 2014.
- [4] Wachtman, J.B.; Haber, R.A. *Ceramic Films and Coatings*. Noyes Publications, 1993.
- [5] Stern, K.H. *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*. London and New York: Chapman & Hall, 1996.
- [6] Miller, R.A. "Thermal barrier coating for aircraft engines: history and direction". *Thermal Spray Technology*, vol. 6, 1997.
- [7] Rangaraj, S.; et al. "A Study of thermal fracture in functionally graded thermal barrier coatings using a cohesive". *Engineering Materials and Technology*, vol. 126, 2014.
- [8] Peters, M.; et al. "EB-PVD thermal barrier coatings for aero-engines and gas turbines". *Advanced Engineering Materials*, vol. 3, 2001.

که در ادامه به‌طور خلاصه، هر یک از این موارد توضیح داده خواهد شد. افزایش تقاضا برای افزایش بازدهی توربین‌های گازی و موتورهای جت، منجر به افزایش دمای کاری توربین‌ها شده است؛ از آنجا که استفاده از YSZ (Yttria-stabilized zirconia) (زیرکونیای پایدار شده با ایتریا) در دماهای بالای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس، سبب ایجاد تغییرات فازی، افزایش حفره‌ها و ترک‌های احتمالی پوشش و لایه لایه شدن آنها می‌شود، پژوهشگران سعی در بهبود خواص این پوشش‌ها با استفاده از مواد جدیدتر کرده‌اند. تحقیقات زیادی برای جایگزینی مواد مناسب به جای YSZ انجام شده است. پیدا کردن ترکیب مناسب به جای YSZ که یک یا دو خاصیت آن بهتر باشد آسان است ولی پیدا کردن ترکیبی که آن را بتوان در حالت کلی با YSZ مقایسه کرد، بسیار کار سختی است [۱۵]. هدایت حرارتی پایین، ضریب انبساط حرارتی بالا، نقطه ذوب بالا، پایداری فاز مناسب، نرخ تف جوشی (Sintering) پایین و مدول یانگ پایین از جمله مهم‌ترین این خصوصیات هستند. مواد جدید با ساختار پیروکلر و یا هگزال‌آلومینیت، دارای خواص حرارتی بسیار عالی برای کاربردهای سد حرارتی اند [۱۶].

در پوشش‌های جدید معمولاً برای از بین بردن عدم انطباق حرارتی بین پوشش‌های سرامیکی و زیرلایه فلزی از پوشش‌های چندگانه استفاده می‌شود در مقایسه با پوشش‌های دو لایه یا معمولی، در اینگونه از پوشش‌ها معمولاً از یک یا چند لایه میانی استفاده می‌شود که مخلوطی از پوشش‌های سرامیکی و پوشش میانی است. نتایج نشان می‌دهد به جهت رعایت شیب غلظت هیچ سطح جدایی مشخصی در بین لایه‌ها در مقایسه با پوشش‌های دولایه وجود ندارد و ساختار پوشش، تقریباً عاری از ترک است. استحکام پوشش‌های چندلایه به مراتب، از پوشش دولایه بیشتر است. به‌طور کلی، این پوشش‌ها توانسته‌اند شرایطی را فراهم کنند تا تنش‌های حرارتی را تا حدودی کم کنند و مقاومت به شوک حرارتی پوشش‌ها را افزایش دهند [۱۷]. پوشش‌های نانو ساختار از ذراتی تشکیل می‌شوند که حداقل در یکی از ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند. روابط

- [9] Wei, Q.; et al. "Novel microstructure of EB-PVD double ceramic layered thermal barrier coatings". *Thin Solid Films*, vol. 516, 2006.
- [10] Li, A.; et al. "Particle characterization and splat formation of plasma sprayed zirconia". *Thermal Spray Coating and Technology*, vol. 15, 2008.
- [11] Pakseresht, A.H.; et al. "Development empirical-intelligent relationship between plasma spray parameters and coating performance of Yttria-Stabilized Zirconia". *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, 2015.
- [12] Fauchais, M.; et al. "Knowledge concerning splat formation: An Invited Review". *Thermal Spray Coating and Technology*, vol. 13, 2008.
- [13] Park, Y.; et al. "Microscopic observation of degradation behavior in yttria and ceria stabilized zirconia thermal barrier coatings under hot corrosion". *Surface & Coatings Technology*, vol. 190, 2005.
- [14] Robert, V.; et al. "Overview on advanced thermal barrier coatings". *Surface & Coatings Technology*, vol., 205, 2010.
- [15] Chen, X.; et al. "New functionally graded thermal barrier coating system based on LaMgAl₁₁O₁₉ / YSZ prepared by air plasma spraying". *Surface & Coatings Technology*, vol. 206, 2012.
- [16] Stöver, D.; et al. "New material concepts for the next generation of plasma-sprayed thermal barrier coatings". *Thermal Spray Coating and Technology*, vol. 13, 2008.
- [17] Khor, K.A.; et al. "Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings". *Thin Solid Films*, vol. 372, 2000.
- [18] Lima, R.S.; et al. "Evaluation of microhardness and elastic modulus of thermally sprayed nanostructured zirconia coatings". *Surface & Coatings Technology*, vol. 135, 2001.
- [19] Zeng, Y.; et al. "Atmospheric plasma sprayed coatings of nanostructured zirconia". *European Ceramic Society*, vol. 22, 2002.

امیرحسین پاکسرشت

پژوهشگاه مواد و انرژی