

مطالعه مکانیزم فرسایش مواد نسوز دلتای سقف در کوره قوس الکتریکی¹

ترجمه: محمدحسین نشاطی

چکیده

مکانیزم فرسایش مواد نسوز مورد استفاده در سقف دلتای کوره قوس الکتریکی (EAF) در این مقاله بررسی شده است. شرکت TRB از مهارت و تخصص خود برای درک فرآیند فرسایش این قطعه حساس، از جمله برخی ابزارهای ابتکاری استفاده کرده است: اندازه‌گیری همه جانبه توسط ترموکوپل‌ها، دوربین حرارتی IR، اسکنر لیزری سه بعدی (3D)، شبیه‌سازی عددی ترمومکانیکی، SEM، فلورسانس اشعه X، پراش اشعه X. این ارائه‌ای از یک دلتای خاص نصب شده در کارخانه یکی از مشتریان ما است که کل مطالعه بر روی آن انجام شده است.

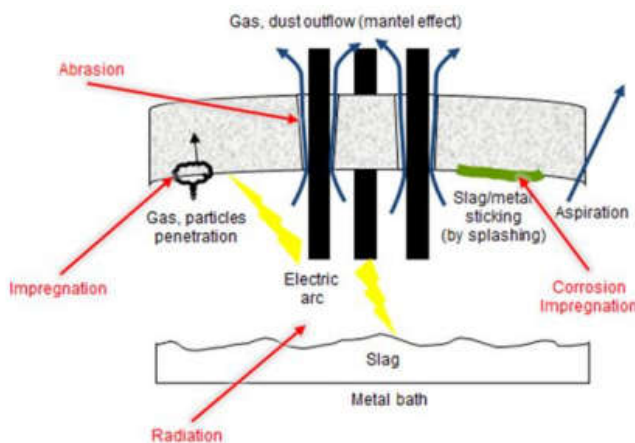
مقدمه

یکی از رایج‌ترین تکنولوژی‌های مورد استفاده در صنایع تولید فولاد، کوره قوس الکتریکی (EAF) است. EAF از یک مخزن آستر شده با نسوز، با درپوش سقف تشکیل شده است. مرکز سقف، دلتا نامیده می‌شود (شکل 1) و از یک محصول نسوز ساخته می‌شود. طی 20 سال گذشته، شرکت TRB دلتاهایی را برای EAF طراحی و تولید کرده است. دلتا از یک شکل پیش‌ساخته (precast) نسوز تشکیل شده است.

مکانیزم فرسایش دلتای سقف به خوبی شناخته شده نیست. این قطعه یکی از قسمت‌های تحت بیشترین تاثیرات در EAF از انواع تنش‌ها، برای مثال حرارتی، شیمیایی و مکانیکی قرار دارد (شکل 2). سطح پایین دلتا در معرض دما توسط تابش و پاشش سرباره است. همچنین در معرض اثر خورنده سرباره و اکسیدهای فلزی می‌باشد. به دلیل طراحی پیچیده دلتا که باید دهانه‌هایی برای الکترودها، متعلقات خنک‌شونده با آب و غیره را در بر گیرد، تحت تنش‌های مکانیکی قابل-توجهی قرار گرفته و شوک‌های حرارتی باعث خراب شدن نسوز می‌شوند.



شکل 1: طرح EAF [1] - دلتای سقف با دایره رنگ قرمز مشخص شده است.



شکل 2: تنش‌ها بر روی دلتای سقف EAF.

¹-Simon Chiartano, STUDY OF WEAR MECHANISMS OF DELTA ROOF REFRACTORIES IN EAF, TRB, Engineering Department, Decines France, ResearchGate, Conference Paper, April 2017.

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری حرارتی

به منظور کمک به کسب دانش بهتر از فرآیندهای تخریب، اندازه‌گیری دمای دلتای سقف در چند کمپین (دوره کارکرد کامل) دلتاها انجام شد. اندازه‌گیری‌ها در ارتفاع و موقعیت‌های مختلف با استفاده از 11 ترموکوپل نوع K و یک دستگاه گردآوری خودکار داده‌ها برای ثبت دما انجام گردید (شکل 3 و 4).

برای تکمیل اندازه‌گیری دما، از یک دوربین حرارتی برای بدست آوردن دمای پایین دلتا استفاده شد. این سنجش دقیقاً پس از باز شدن سقف EAF انجام گردید.

شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزای محدود (FEA) به ما کمک می‌کند تا رفتار ترمومکانیکی دلتا را در عمل درک کنیم. این مطالعه شامل محاسبه حالت گذرای کاملاً همراه حرارتی و مکانیکی است. مرزهای حرارتی، تابش و یا همرفت سرباره ذوب، الکترودها، هوای محیط و سیستم خنک‌کننده در دلتا را لحاظ می‌کنند. مرزهای مکانیکی فقط حلقه فلزی اطراف دلتا را در نظر می‌گیرند. **جدول 1** را ببینید.

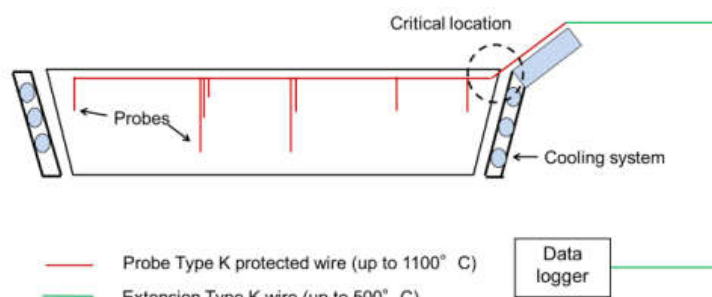
مش‌بندی طرح دلتا از 31112 عنصر چهار وجهی تشکیل شده است، به شکل 5 مراجعه کنید.

اندازه‌گیری فرسایش

TRB از یک اسکنر لیزری 3D برای رسیدن به ایده‌ای دقیق از فرسایش سقف دلتا استفاده می‌کند. اسکنر امکان اندازه‌گیری دقیق و سریع بر روی هر نوع قطعه یا سازه را فراهم می‌کند. انطباق برهم چند ابر نقاط تهیه‌شده در تاریخ‌های مختلف، برآورد دقیق ضخامت فرسایش و همچنین پوشش نسوز باقیمانده را ارائه می‌دهد.



شکل 3: نصب ترموکوپل‌ها در دلتای سقف.



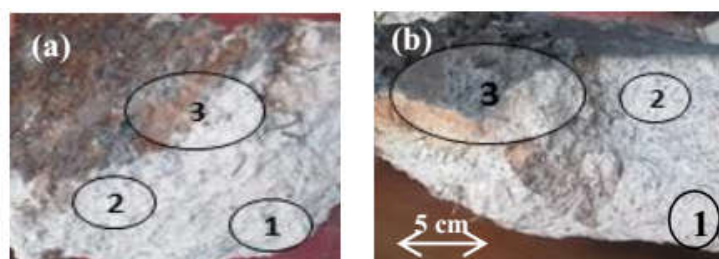
شکل 4: محل ترموکوپل‌ها در دلتای سقف.

جدول 1: مرزهای شبیه‌سازی عددی.

مرز حرارتی	مرز مکانیکی	مکان
تبادل تابشی چرخه‌ای با الکترودها و سرباره ذوب	آزاد	
تبادل همرفتی و تابشی با هوای محیط	آزاد	
تبادل همرفتی با آب	اتصال صفحه‌ای	



شکل 5: مش‌بندی شبیه‌سازی عددی.



شکل 6: نمونه‌های خورده شده جمع‌آوری شده برای بررسی‌های پس از خرابی.

تجزیه و تحلیل پس از خرابی

نمونه‌های مربوط به وجه گرم سقف دلتای مجهز شده به ابزار دقیق پس از استفاده گردآوری شدند. شکل 6 نمای نمونه‌های خورده شده و مناطق مختلف آنالیز شده را نشان می‌دهد: در تماس با الکتروود (a)، در تماس با سرباره (b).

منطقه 3 مربوط به سطح تماس سرباره/نسوز است. در هر دو نمونه، منطقه 1 و 2 به ترتیب واقع در 10 و 1 سانتیمتری از وجه گرم با دلتای کاستابل (نسوزهای قالبگیری شده) بدون خوردگی (تایید شده توسط اندازه‌گیری‌های اشعه ایکس مندرج در جدول 2) مطابقت دارد.

نتایج و بحث

اندازه‌گیری حرارتی

دستگاه گردآوری‌کننده خودکار داده‌ها دمای 11 ترموکوپل را در طی 180 ساعت اول عمر سقف دلتا ثبت کرد. به شکل 8 و 9 مراجعه کنید.

با استفاده از دوربین حرارتی، درست بعد از برداشتن سقف، تصویر ترموگرافی (شکل 10) از زیر دلتا گرفته شد. هنوز انتهای الکتروودها در داخل دهانه‌ها قابل مشاهده است. این اقدام بر روی یک دلتای نسبتاً نو انجام شد.

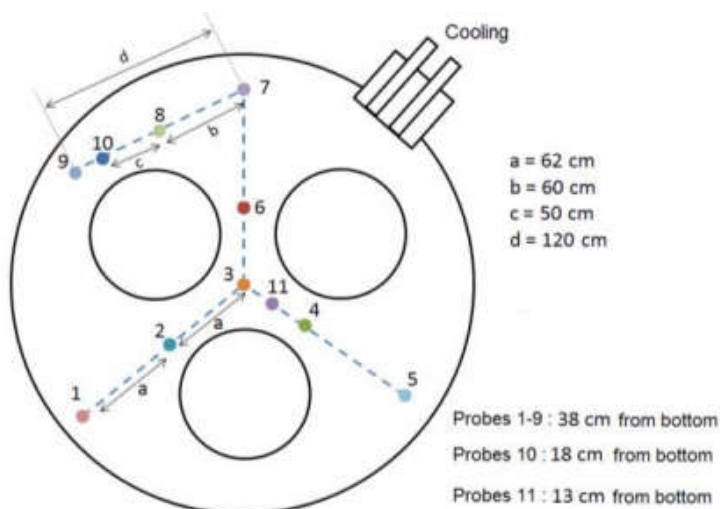
شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی رفتار دلتای سقف را در طی 40 ساعت اول عمر آن مطالعه می‌کند. شکل 11 تغییرات دما را در 3 صفحه برش نشان می‌دهد: عمود از مرکز (شکل 1-11)، عمود از دو دهانه (شکل 2-11) و وسط ارتفاع افقی یعنی 38 سانتیمتر از پایین (شکل 3-11). نتایج دما توزیع دمای نسبتاً کم را نشان می‌دهد. برای بیشتر دلتا، دما در زیر 600°C است. این را می‌توان با خنک‌سازی حلقه فلزی توضیح داد.

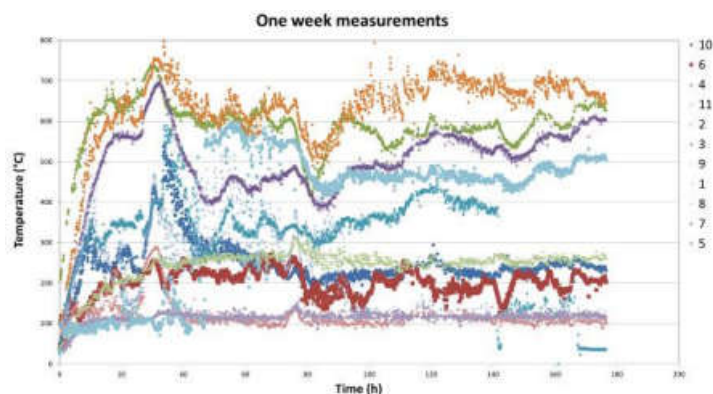
در وجه پایین، دما البته به چرخه‌های گرمایش بستگی دارد، اما از 500 تا 1050°C متغیر است.

جدول 2: آنالیز شیمیایی توسط XRF.

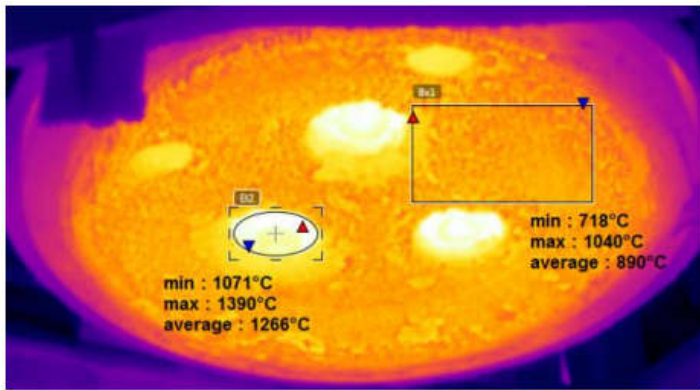
	دلتای مرجع	نمونه خورده شده						سرباره	
		a			b				
چگالی حجمی	در 2640 110°C	2760			2677				
تخلخل باز	در 13 110°C	13.7			15.4				
منطقه		1	2	3	1	2	3		
ترکیب شیمیایی (%)	Al_2O_3	63	63.2	63	2.5	62.2	63.3	1.9	
	SiO_2	30	29.5	29.4	8	29.5	29.4	7.6	33.8
	TiO_2	1.4	1.8	1.9	0.2	1.8	1.9	0.5	2.2
	Fe_2O_3	0.9	1.2	1.3	65	0.9	1.2	61.5	2.7
	CaO	0.5	0.5	0.5	6.1	0.4	0.7	8.4	44
	ZrO_2	4.1	3	3.3		4.2	3.3		
	K_2O	<0.3	0.2	0.2		0.2	0.2		
	MnO								1.1
	MgO								12
	Cr_2O_3								4.2



شکل 8: محل سنسورها.



شکل 9: نتایج پروب‌ها در طی یک هفته.



شکل 10: ترموگرافی پایین دلتای سقف.

این سطح دما در زیر دلتا نسبت به مطالعات قبلی بسیار کم است:

- Chan : 1027°C [6]
- Henning : 1527°C [9]
- Pfeifer : 1027 تا 1327°C [4]
- Henning : 1527°C [9]
- Gruber : 1027°C [7]
- Guo : 1032 تا 1400°C [5]

در این منابع، دمای دلتا هدف نهایی از شبیه-

سازی نبوده و گاهی اوقات دمای سقف را فقط فرض کرده‌اند ([6]، [9]). در موارد دیگر، خنک‌سازی سقف در نظر گرفته نشده بود [5] این امر به راحتی نتایج حرارتی بالاتر را توضیح می‌دهد.

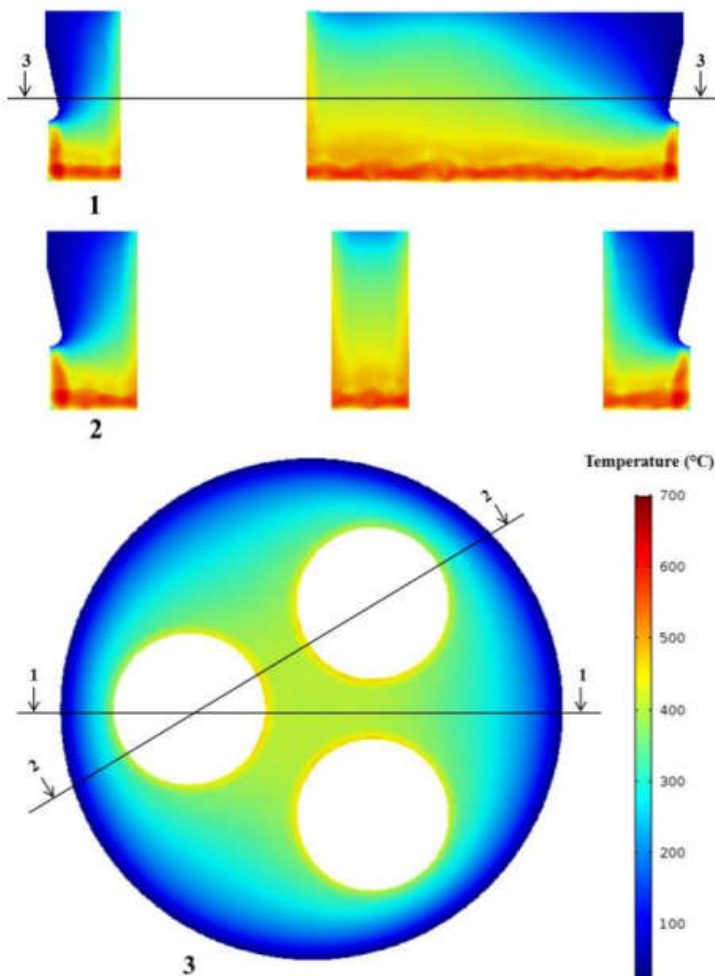
نتایج تنش مکانیکی Von Mises (شکل 12) توزیع مطابق با تغییرات حرارتی را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که محدوده حلقه فلزی تأثیر زیادی بر تنش‌ها ندارد. از آنجا که دلتا برای حرکت بالا و پایین در این محدوده آزاد است، هیچ تمرکز

تنشی ایجاد نمی‌کند. از طرف دیگر، بیشترین تنش‌ها در اطراف و بین دهانه‌های الکتروود حاصل می‌شوند. در این موارد، میزان تنش حتی بیشتر از وجه پایین است.

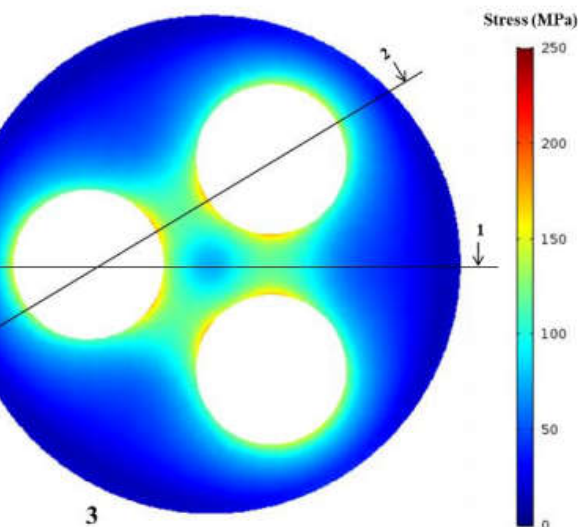
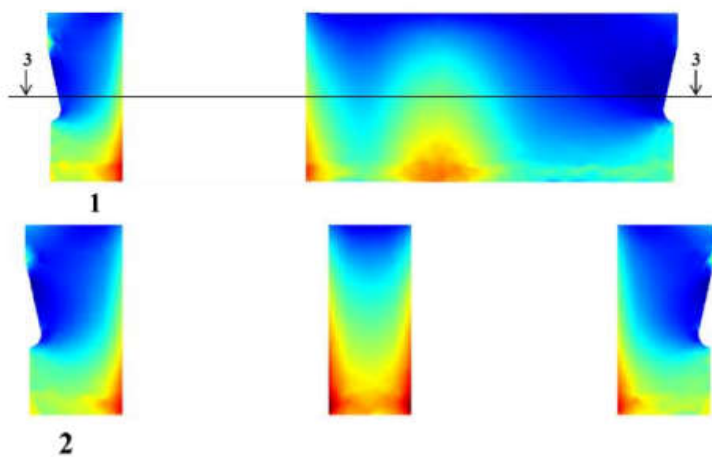
یک بررسی همبستگی برای بدست آوردن اعتبار شبیه‌سازی انجام شد. شکل 13 نتایج حالت گذرا در نقاط 1، 2، 8 و 11 با خط پر برای اندازه‌گیری ترموکوپل‌ها و خط چین برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج منطقی و سازگار است. مقادیر اندازه‌گیری شده متغیرتر هستند، اما بطور کلی، میزان دما بطور متوسط یکسان است. تفاوت را می‌توان با شرایط فرآیند توضیح داد که بیشتر از آنکه چرخه‌های دوره‌ای در شبیه‌سازی در نظر می‌گیرند دارای نوسان هستند.

اندازه‌گیری فرسایش

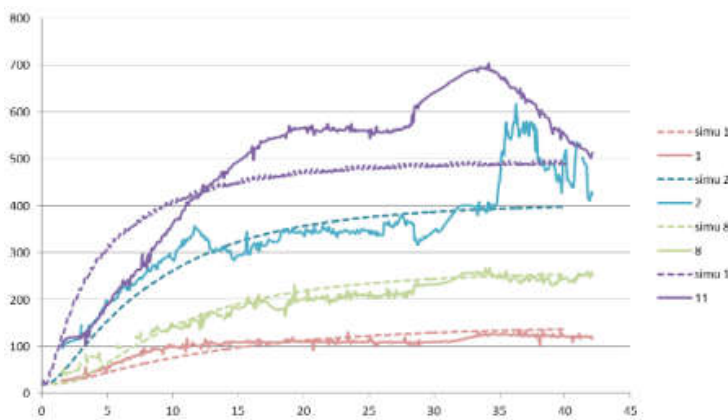
اسکن سه بعدی برای اندازه‌گیری دقیق فرسایش دلتا انجام شد. شکل 14 ابر نقاط سقف دلتای جدید را نشان می‌دهد. این روش نتایج ترمو- مکانیکی را تأیید می‌کند: بیشتر اوقات، حداکثر فرسایش در نزدیکی دهانه‌های الکتروود قرار دارد.



شکل 11: نتایج شبیه‌سازی بعد از 40 ساعت: دما (°C).



شکل 12: نتایج شبیه‌سازی پس از 40 ساعت: تنش‌های VM (MPa).



شکل 13: همبستگی حرارتی بین اندازه‌گیری ترموکوپل‌ها (خط پر) و شبیه‌سازی (خط چین).

تغییرات فرسایش کلاسیک سقف دلتا در انتهای کمپین (دوره کاری) در شکل 15 نشان داده شده است. شکل کلی فرسایش پایین (خط چین قرمز) همبستگی خوبی با تغییرات ترمو-مکانیکی شبیه‌سازی دارد (شکل 1-12).

در اطراف دهانه‌های الکترو، فرسایش مهم است، زیرا گاهی اوقات، قطعه پیش‌ساخته می‌تواند بشکند و جدا شود. در نزدیکی ترموکوپل شماره 5، پس از تقریباً 45 ساعت، فرو ریختن بخشی از دلتا در نزدیکی یک دهانه رخ داده است. شکل-16 را ببینید.

تجزیه و تحلیل پس از خرابی

جدول 2 آنالیز شیمیایی در مناطق مختلف 1، 2 و 3 را نشان می‌دهد. آنالیز شیمیایی، انجام شده بر روی وجه گرم (منطقه 3)، محتوای مهم اکسید آهن را نمایان می‌سازد. از آنجا که ترکیب شیمیایی سربراره دارای مقدار زیادی آهک است (جدول 2)، ثابت می‌کند که وجه گرم در تماس با سربراره نیست. لایه نازکی که روی نمونه‌ها دیده می‌شود بیشتر رسوب فولاد است. مقدار تخلخل باز و چگالی حجمی نزدیک به دلتای مرجع اولیه است و این تایید می‌کند که مواد توسط سربراره خورده نمی‌شوند.

جدول 3 فازهای اصلی و جزئی کانی شناسی

را که با اندازه‌گیری اشعه X شناسایی شده‌اند، نشان می‌دهد. در هر دو نمونه، فازها با نسوز بدون خوردگی مطابقت دارند زیرا دلتای مورد استفاده در این مطالعه عمدتاً متشکل از مولایت است.

در هر دو نمونه، محتوای آندالوزیت در منطقه 1 و 2 قابل توجه است. وجود آندالوزیت در نمونه‌ها ثابت می‌کند که دما کمتر از 1300°C است

زیرا مولایتی شدن آندالوزیت در این دما آغاز می‌شود [2]. علاوه بر این، آنورتیت نیز در همه مناطق یافت شده است. تبلور آنورتیت بین 900°C و 1100°C روی می‌دهد [10] بنابراین دما در نمونه‌ها به حداقل 900°C می‌رسد. از این رو، دامنه دما در وجه گرم سقف دلتا بین 900°C تا 1300°C است.

نتیجه گیری

شرکت TRB برای بهبود درک مکانیزم‌های فرسایش در سقف دلتای EAF از تمام کنترل‌های موجود خود استفاده می‌کند.

اندازه‌گیری‌های حرارتی درون نسوز و روی پوسته آن انجام شد. نتایج میزان نسبتاً کم دما، کمتر از 600°C درون دلتا و حداکثر 1050°C در وجه گرم را نشان می‌دهند.

یک شبیه‌سازی عددی این داده‌ها را تأیید می‌کند و تغییرات حرارتی با خنک‌سازی حلقه فلزی را توضیح می‌دهد. این محاسبه ما را از مکان‌هایی که تنش‌های ترمومکانیکی در آنها بحرانی است نیز مطلع می‌سازد.

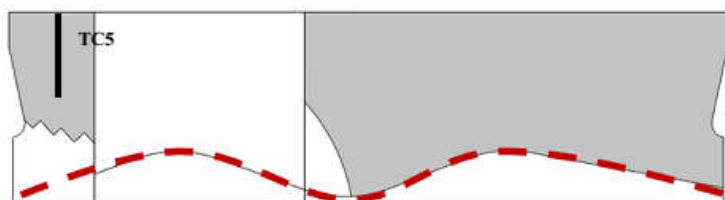
اندازه‌گیری فرسایش با استفاده از اسکن سه بعدی نتیجه شبیه‌سازی در مورد منطقه بحرانی بودن دهانه‌های الکتروود در دلتای سقف تأیید می‌کند.

سرانجام، تجزیه و تحلیل پس از خرابی بر روی 3 منطقه مختلف بر روی 2 نمونه انجام شد. نتایج XRD و XRF ثابت می‌کند که خوردگی سرباره قابل توجه نیست. این آزمایش‌ها همچنین نشان می‌دهد که دمای وجه پایین دلتا می‌بایستی بین 900 تا 1300°C باشد که با محاسبه حرارتی مطابقت دارد.

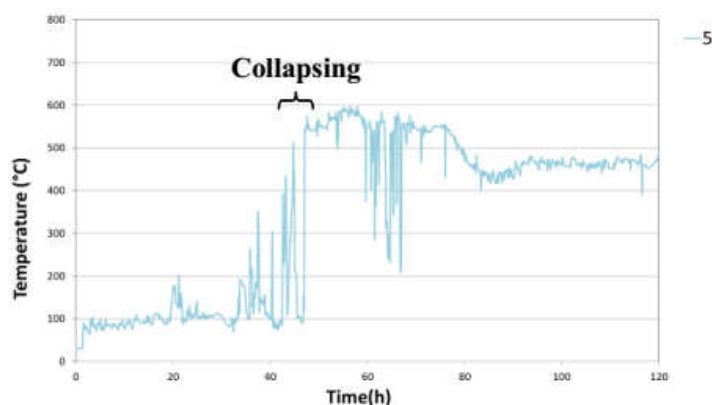
در نتیجه، یک دستورالعمل نسوز جدید به منظور افزایش خواص مکانیکی در دمای پایین (زیر 1200°C) تدوین شد. در مقایسه با دلتای مرجع، مقاومت مکانیکی (پس از پخت در دمای 1000°C) تا 40 MPa افزایش یافت. علاوه بر این، تخلخل باز تا 4 درصد کاهش یافت و مقاومت در برابر شوک حرارتی در دمای 1000°C بیش از دو برابر مرجع بود.



شکل 14: ابر نقاط دلتای سقف (جدید).



شکل 15: تغییرات فرسایش نمونه‌وار دلتا در پایان یک دوره کار (کمپین).



شکل 16: فروریختن بخشی از دلتای سقف در نزدیکی ترموکوپل TC 5.

جدول 3: آنالیز کانی‌شناسی توسط پراش اشعه X.

فازهای اصلی	a		b	
	منطقه 1	منطقه 2	منطقه 1	منطقه 2
کورانندوم	+++	+++	+++	+++
مولایت	++++	++++	++++	++++
بادلیت	+	+	+	+
آندالوزیت	++	++	++	++
کوارتز	+	+	+	+
زیرکون	--	--	--	--
آنورتیت	+	+	+	+

- [1] **Siemens global Website:** Simetal EAF FAST DRI Siemens.
<http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2012/industry/metals-technologies/2012-03-steel/simetal-eaf-fast-dri-en.pdf>
- [2] **Bouchetou M.L.; Poirier J.; Ildefonse J.P.; Hubert P.:** Kinetics of Mullitization of Andalusite Crystals and Role of the Transformations at High Temperature of the Minor Mineral Inclusions, pp. 360-366
- [3] **Wang, T.; Liu, B.:** The factors effecting on the service life of HP/UHP EAF roof ; UNITECR 2003, pp. 557-559.
- [4] **Pfeifer, H.; Echterhof, T.; Voj, L.; Gruber, J.; Jung, H.-P.; Lenz, S.; Beiler, C.; Cirilli, F.; De Miranda, U.; Veneri, N.; Bressan, E.:** EUR 25078 - Control of nitrogen oxide emission at the electric arc furnace - CONOX, European Commission, Luxembourg, (2012), pp. 92 - 126
- [5] **Guo, D.; Irons, G.:** Radiation Modeling in an EAF, AISTech 2004 Proceedings, Vol. 1, pp. 991-999
- [6] **Chan, E.; Riley, M.; Thomson, M.J.; Evenson, E.J.:** Nitrogen Oxides (NOx) Formation and Control in an Electric Arc Furnace (EAF): Analysis with Measurements and Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling, ISIJ Int., 44 (2004), pp. 429 - 438
- [7] **Gruber, J. C.:** Development of a Numerical Model for the Heat and Mass Transport in an Electric Arc Furnace Freeboard, Faculty of Georesources and Materials Engineering of the RWTH Aachen University
- [8] **Arzpeyma, N.:** Modeling of Electric Arc Furnaces (EAF) with electromagnetic stirring, School of Industrial Engineering and Management Department of Materials Science and Engineering, Stockholm
- [9] **Henning, B.; Shapiro, M.; le Grange, L.A.:** DC Furnace Containment Vessel Design using Computational Fluid Dynamics, Proc. of 10th International Ferroalloys Congress, SAIMM, Johannesburg, (2004), pp. 565 – 574
- [10] **Klein L.; Uhlmann D. R.:** Crystallization behavior of anorthite, JCR, November 1974