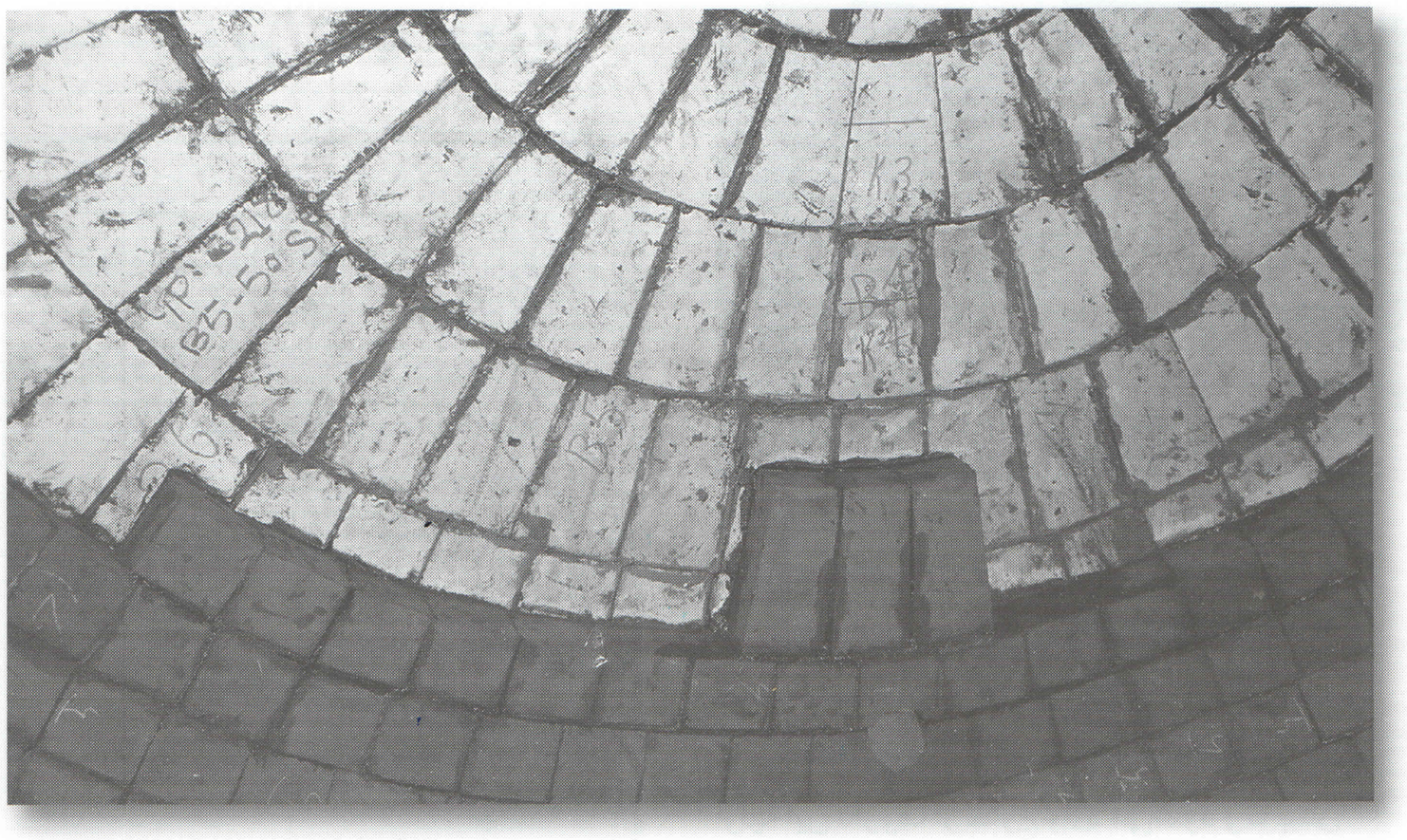
آجرکاری تجهیزات با دما و فشار بالا



مقدمه:

اغلب تجهیزات، مخازن، راکتورها و برج‌های فولادی یک واحد شیمیایی به دلیل مقاومت در برابر مواد شیمیایی خورنده و نیز دمای بالا، دارای سیستم آجرکاری هستند. انتخاب نوع سیستم و نیز نوع آجر، ملات و لایه حایل به نوع، غلظت و شدت مواد خورنده و نیز درجه حرارت موجود که خود بر شدت خورندگی مواد خورنده تاثیر دارد، بستگی خواهد داشت.

در مخازنی که در دما و فشار بالا کار می‌کنند، سیستم آجرکاری داخل آن‌ها باید چسبندگی بالا به لایه‌های زیرین و نیز بدنه فولادی داشته باشد.

به دلیل وجود تخلخل در کاشی و آجرهای ضد اسید و نیز نفوذپذیر بودن ملات‌های مورد استفاده در بندها (به دلیل درصد بالای فیلر در آن‌ها) مایعات خورنده قادر خواهند بود تا از میان تخلخل‌های موجود، خود را به بدنه فولادی مخزن برسانند.

«آجر چینی» بدون حباب هوا در ملات‌های نصب و بندکشی، در عمل ممکن نیست ولی امکان به حداقل رساندن آن‌ها وجود دارد که در این حالت می‌توان یک آجرکاری بدون لایه حایل (membrane) اجرا کرد. البته این به شرطی است که حباب‌های باقی‌مانده بسیار ریز بوده و در عین حال به‌هم متصل نباشند.

اغلب یک لایه حایل membrane، دارای مقاومت شیمیایی لازم در برابر مواد خورنده است و فقط به منظور افزایش مقاومت‌های مکانیکی و حرارتی بر روی لایه حایل از سیستم آجرکاری و کاشی‌کاری ضد اسید استفاده می‌کنند.

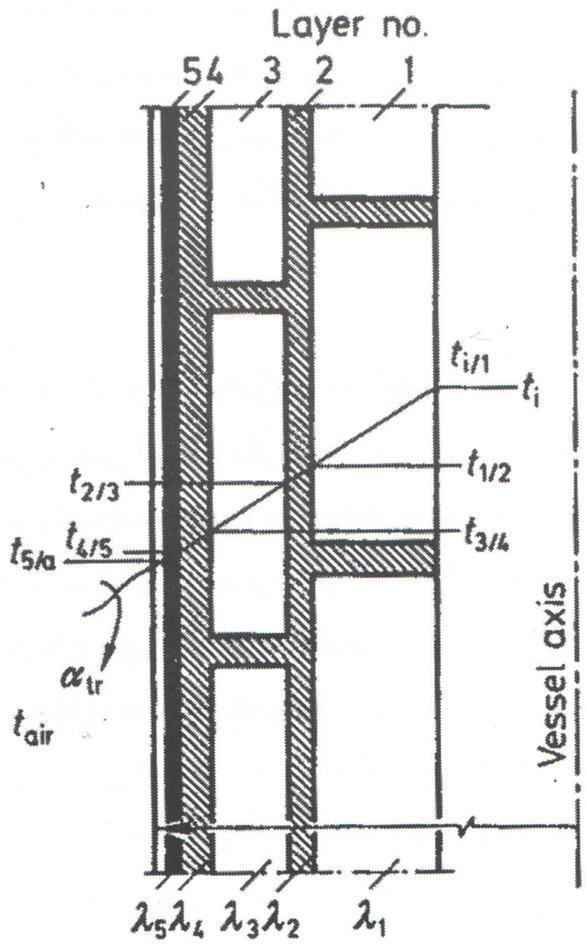
در مخازنی که امکان به‌وجود آمدن تنش‌ها و بارهای مکانیکی و شوک‌های حرارتی وجود دارد، ترک خوردن سیستم آجرکاری (به ویژه در ملات داخل بندها) اجتناب ناپذیر است از این رو برای جلوگیری از نفوذ مواد خورنده به سطح فولادی زیر کار، از لایه حایل استفاده می‌شود.

در زمان طراحی تفضیلی مخازن و تعیین جزییات، باید ۲ پارامتر مهم «رسانایی حرارتی» و «ابعاد هندسی لاینینگ»، مورد بررسی قرار گیرد.

تهیه و تنظیم: مهندس پوریا آذربخت
مدیر عامل شرکت مهندسین مشاور آذران پوشش بسپار
azarbakht@azaranpoushesh.com

روابط دما و تنش در آجرکاری

در تصویر شماره ۱، گرادیان حرارتی مواد و لاینینگ‌های مختلف بر حسب رسانایی حرارتی آن‌ها نشان داده شده است. با فرض این که رسانایی حرارتی تمام لایه‌ها (۱ تا ۵) برابر λ باشد در این صورت در شرایط ثابت یک جریان گرمایی، یک خط مستقیم بین $t_{1/1}$ و $t_{5/a}$ به‌دست می‌آید. (در این تصویر فرض می‌شود که مخزن از مایع پر شده و انتقال حرارت داخلی نادیده گرفته می‌شود).



تصویر شماره ۱

بنابراین دمای متوسط لایه دارای شماره کم‌تر، همیشه بیش‌تر از دمای متوسط لایه‌ای با شماره بیش‌تر است حتی اگر به علتی لایه شماره ۱ (لایه آجرکاری داخلی) از کاشی‌های گرافیتی که گرما را خیلی خوب هدایت می‌کنند تشکیل شده باشد یا اگر یک رابر سخت با رسانایی حرارتی ناچیز بین لایه شماره ۴ (ملات نصب) و لایه شماره ۵ (بدنه فولادی مخزن) قرار داده شده باشد.

با فرض یکسان بودن ضرایب انبساط حرارتی لایه‌ها و با توجه به این که دما از لایه‌ای به لایه دیگر کاهش می‌یابد، بنابراین انبساط حرارتی حاصل در هر لایه با افزایش شماره لایه کاهش می‌یابد. هم‌چنین تنش کششی در لایه‌های خارجی و فشار در لایه داخلی به طور اجتناب ناپذیری افزایش خواهد یافت.

اما این واقعیت وجود دارد که لایه‌های ذکر شده در بالا دارای ضرایب انبساط حرارتی و نیز رسانایی حرارتی بسیار متفاوتند. پس روابط بارهای به‌وجود آمده به علت رفتارهای مختلف لایه‌ها، بسیار متفاوت خواهد بود.

به منظور محاسبه تقریبی کشش و تنش، می‌توان ضریب انبساط حرارتی یک آجرکاری را نصف بدنه فولادی در نظر گرفت. اگر هیچ چسبندگی بین بدنه فولادی مخزن و آجرکاری وجود نداشته باشد، بدنه استوانه آجرکاری شده با فشار داخلی ناشی از فرآیند در معرض بارهایی قرار می‌گیرد که از مقاومت کششی ضعیف آجرکاری بیش‌تر است و در نتیجه در زمان استفاده از مخزن، مواد شیمیایی خورنده وارد حفره‌ها و شکاف‌های موجود در سیستم آجرکاری می شود و در طول بدنه به جریان

می‌افتد و باعث خوردگی بدنه فولادی مخزن می‌شود.

اما در صورت چسبندگی خوب بین بدنه فولادی مخزن و لایه آجرکاری شده، بدنه که مورد تأثیر گرمای بیش‌تر از آجرکاری است، منبسط می‌شود و لایه‌های آجرکاری شده را به طرف خود می‌کشد و در آن‌ها تنش کششی ایجاد می‌کند. تنش‌های کششی ایجاد شده در هر لایه لاینینگ به وسیله فشار داخلی نیز به تنش کششی ایجاد شده به وسیله بدنه اضافه می‌شود و در نهایت باعث ترک خوردن سیستم آجرکاری می‌شود.

بنا به دلایل گفته شده، آجرکاری مخازن و تجهیزاتی که در دمای بالا کار می‌کنند، باید ضخیم باشد. البته با استفاده از آجرهای عایق حرارتی که از رسانایی حرارتی بسیار پایینی برخوردارند، می‌توان ضخامت آجرکاری را تا حدی کاهش داد ولی این را باید در نظر گرفت که مقاومت فشاری و مقاومت کششی این نوع از مواد پایین است.

برای آن که بتوان تخمینی در باره مقاومت لازم لاینینگ‌ها در برابر بارها و تنش‌های به‌وجود آمده داشته باشیم، باید از بزرگی این بارها اطلاع داشت. برای محاسبه تنش علاوه بر مشخصاتی که تا کنون به آن اشاره کردیم، نیاز به پارامتر ضریب کشسانی E (بر حسب N/mm^2 و یا kg/cm^2 و یا lbs/sqi) تمام مواد مورد استفاده در آجرکاری است. در صورتی می‌توان از صدمات جلوگیری کرد که تمام تنش‌ها در محدوده رفتار الاستیک مواد باقی بمانند.

بر اساس قانون Hook خواهیم داشت:

$\sigma=\varepsilon\times E$

σ برحسب N/mm^2 بار

ε بر حسب mm/mm کشش

E بر حسب N/mm^2 ضریب کشسانی

ε (به اصطلاح کشش‌های اجباری) ناشی از فعل و انفعال انبساط حرارتی بین لایه‌های مختلف (در اینجا بدنه فولادی نیز به عنوان یک لایه در نظر گرفته می‌شود) و انبساط حاصل از فشار داخلی است.

روش زیر می‌تواند برای محاسبه کشش‌ها و بارها مورد استفاده قرار گیرد:

از انتقال گرمای خارجی α_{tr} بر حسب $W/(K.m^2)$ شروع می‌کنیم.

s: ضخامت لایه مورد نظر بر حسب میلی‌متر

λ: رسانایی گرمایی آن برحسب $W/(K.m^2)$

اعداد Nusselt را می‌توان برای هر لایه به این طریق به‌دست آورد:

$$Nu=\alpha_{tr}.s/\lambda$$

که با کمک آن‌ها دما در داخل، خارج و در نهایت در وسط هر لایه می‌تواند محاسبه شود. از آن‌جا که هیچ تنش حرارتی بین لایه‌های مختلف بدنه و سیستم لاینینگ در دمای نصب آجرکاری رخ نمی‌دهد، می‌توان اختلافات را به طریق زیر به‌دست آورد:

$$\upsilon=t-t_{inst}$$

t: دمای لایه

t_{inst}: دمای نصب

با ضرب این مقادیر در ضرایب انبساط گرمایی، میزان انبساط گرمایی لایه‌ها را به‌دست می‌آوریم:

$$\varepsilon=\upsilon.\alpha$$

که به اصطلاح انبساط‌های آزاد نامیده می‌شوند زیرا از تأثیر فعل و انفعالات مجاور آزادند.

با این وجود لایه‌ها آزاد نیستند بلکه از آن‌جا که به یکدیگر متصلند، به‌وسیله چسبندگی یا فعل و انفعال فشاری ۲ جانبه مطابق با قدرت ذاتی هر لایه بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند که از نظر فنی به طریق زیر بیان می‌شود:

$$P=1.s.E$$

P: نیرو برحسب نیوتن

1: واحد ارتفاع لایه به میزان ۱ میلی‌متر

s: ضخامت لایه برحسب میلی‌متر

E: ضریب کشسانی بر حسب N/mm^2

اکنون می‌توان انبساط ایجاد شده برای کل سیستم را به کمک این معادلات محاسبه کرد:

برای یک لایه تنها $A=Pathwa\times Power=P.\varepsilon$

برای مجموع لایه‌ها $\Sigma A=\Sigma(P.\varepsilon)=\Sigma(\varepsilon.1.s.E)$

در نتیجه حاصل تقسیم $\Sigma A/\Sigma P$ عددی برای مسیر انبساط است. با در نظر گرفتن فعل و انفعال کنش حرارتی بین لایه‌های $(1\rightarrow n)$:

$$\Phi_t=\Sigma(\varepsilon.1.s.E)/\Sigma(1.s.E)$$

با به‌دست آوردن تفاضل بین مقدار Φ_t (که باید برای هر لایه سیستم مقدار یکسانی باشد) و مقادیر (ذکر شده در بالا)، مقدار تنش ناشی از فعل و انفعال این لایه‌ها به‌دست می‌آید.

$\varepsilon_t=\Phi_t-\varepsilon$ (لایه شماره $1\rightarrow n$)

و تنش‌های مربوطه (بازهم با استفاده از قانون هوک) به ترتیب زیر است:

$$\sigma_t=\varepsilon_t-E$$

چگونه از تنش‌های مخرب جلوگیری کنیم؟

اغلب سازه‌های آجرکاری شده در برابر تنش‌های کم دارای مقاومتند از این رو توصیه می‌شود تا از به‌وجود آمدن هر گونه تنش (حتی کوچک) در سازه‌های ضد اسیدی تا حد امکان جلوگیری شود و یا حداقل آن‌ها را محدود کرد. در باره محدود کردن تنش‌ها، پیشنهاد می‌شود تا عملیات پیش تنیدن به صورت پیش فشردن در آجرکاری و لاینینگ و به صورت پیش کشیدن در بدنه فولادی ایجاد شود.

در قسمت‌هایی که بدنه فلزی مخزن خم می‌شود، تنش‌های کششی ایجاد شده در آجرکاری داخل مخزن، بسیار خطرناک است. این مشکل را می‌توان با استفاده از طراحی مناسب مخزن از بین برد.

در ابتدا استفاده از مخازن کروی توصیه می‌شد چرا که از نظر تئوریک، این نوع مخازن دارای بهترین شکل برای جلوگیری از تنش‌های مخربند اما در عمل این نوع مخازن نیز به طور کامل مشکلات ذکر شده در بالا را مرتفع نمی‌کردند زیرا پشتیبان‌هایی که برای مخازن کروی که در دما و فشار داخلی بالا کار می‌کنند، بدون ایجاد تنش خمشی نقطه‌ای، کاری بسیار مشکل است.

بنا به دلایل گفته شده، بهترین حالت برای ساخت یک مخزن دارای آجرکاری که باید در دما و فشار بالا کار کند، شکل استوانه‌ای با کف و درپوش بشقابی شکل بوده و البته بهتر است تا حد امکان به صورت عمودی قرار گیرند. در مخازن استوانه‌ای، فشار داخلی، وزن خود مخزن و نیز وزن مواد پر شده در داخل مخزن، به صورت متقارن عمل می‌کنند و نسبت به مخازن استوانه‌ای افقی، محاسبات بارها و تنش‌های ایجاد شده (به ویژه تنش‌های حلقوی) در آن‌ها آسان‌تر است.

محاسبه تنش‌های مخازن استوانه‌ای افقی بسیار پیچیده و پرحجم است. به علت حالت افقی مخزن و بارهای به‌وجود آمده در این حالت و نیز به هنگام پر کردن مخزن از مواد، شکل دایره‌ای مخزن متحمل تغییر شکل‌هایی می‌شود که برای آجرکاری داخل آن بسیار خطرناک است. البته بیش‌تر این تغییر شکل‌ها زمانی رخ می‌دهد که ضخامت بدنه فولادی مخزن بسیار کم بوده و یا تکیه‌گاه‌های پشتیبان خیلی کوچکند.

انحراف از شکل دایره‌ای مخازن استوانه‌ای نباید بیش‌تر از ۰/۴ شعاع متوسط مخزن باشد.

انحرافات بیش از حد، باعث تغییر شکل‌های خمشی که برای لاینینگ خطرناک است، می‌شود.

مخازن آجرکاری شده برای دماهای بالا

مخازنی که در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند و داخل آن‌ها آجرکاری نسوز و یا ضد اسید انجام می‌شود، اغلب دارای بدنه فولادی با ضخامت کم هستند؛ حتی اگر قطر آن‌ها زیاد باشد.

مشاهده شده که به منظور حمایت بدنه مخزن، پشت‌بندها و یا حلقه‌های فولادی تختی که به شکل‌های L یا T هستند، بر روی بدنه جوشکاری می‌کنند. باید از این روش به طور مطلق دوری کرد زیرا پشت بندهای فولادی همواره خنک‌تر از بدنه فولادی هستند و این امر باعث ایجاد رگه‌ها و خم شدگی‌های حلقه‌ای شکل بر روی بدنه و لاینینگ آن می‌شود. تنش‌های به‌وجود آمده اغلب متناسب با بدنه فولادی نیستند و می‌توانند باعث تخریب لاینینگ شوند.

به طور معمول، مخازن بدون فشار داخلی را با کف تخت طراحی کرده و می‌سازند. مخازن آجرکاری شده که در دماهای بالا کار می‌کنند، باید دارای کف بشقابی باشند. دلیل آن هم پرکردن مخازن سرد با مایع گرم و داغ است که باعث ایجاد تنش‌های مخرب در مخزن می‌شود. به دلیل گرمای ایجاد شده، حرارت داخل مخزن به سرعت بالا می‌رود و آجرکاری داخل مخزن گرم شده و منبسط می‌شود، این در حالی است که به علت تاثیر مانع حرارتی سیستم آجرکاری، بدنه فولادی مخزن هنوز سرد است. این امر باعث ایجاد تنش شده که به وسیله فشار داخلی ایجاد می‌شود و چون در مخازن با فشار بالا از کف بشقابی استفاده می‌شود، در این حالت نیز برای مخازن با دمای بالا، کف بشقابی شکل توصیه شده و استفاده از کف تخت برای این مخازن ممنوع است.

به منظور کنترل فرآیند داخل مخازن، استفاده از چند منفذ شیشه‌ای بر روی مخزن پیشنهاد می‌شود ولی به دلیل ایجاد نقاط ضعیف در لاینینگ، تعداد آن‌ها باید محدود باشد.

خسارات ناشی از تأثیرات خارجی و تغییر شکل‌های بدنه

تاسیسات شیمیایی که در فضای باز بوده و در برابر شرایط اتمسفریک (مانند نور مستقیم خورشید، باد، باران و برف) قرار دارند، باید به‌وسیله ایجاد سقف و نیز سیستم تهویه مناسب، در شرایط متعادل قرار گیرند.

گردش هوای سرد در محیط‌های سربسته که مخازن و تجهیزات آن با دمای بالا کار می‌کنند و یا به عبارت دیگر داغ هستند، باعث صدمه به تجهیزاتی مانند (cellulose digester) می‌شود.

تغییر شکل‌هایی که در محل جوشکاری ورق‌های مخزن به علت عدم یکنواختی جوشکاری و نیز گرد نشدن لبه‌های نورد شده ورق‌ها به‌وجود می‌آید، باعث ایجاد تنش در مخزن شده و در نهایت باعث تخریب آجرکاری داخل مخزن می‌شود.

فقط می‌توان بر روی مخازن و تجهیزات آجرکاری شده‌ای که در دماهای پایین کار می‌کنند، از عایق‌های حرارتی برای حفاظت در برابر شرایط اتمسفریک استفاده کرد. در صورتی که دمای سرویس این مخازن و تجهیزات بیش از ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد باشد، استفاده از عایق‌های حرارتی به هیچ وجه توصیه نمی‌شود چون عایق‌های حرارتی به دلیل ایزوله کردن مخزن، باعث گرم شدن بدنه فولادی مخزن می‌شوند. این امر باعث منبسط شدن بیش‌تر بدنه فولادی نسبت به آجرکاری و در نهایت باعث ترک خوردن آجرکاری می‌شود. هم‌چنین در صورت استفاده از عایق حرارتی در پیرامون مخازن، دیگر امکان مشاهده و بازرسی بدنه مخازن در صورت ایجاد خوردگی و نشتی وجود ندارد.

تأسیسات دارای عایق حرارتی داخلی

سطوح داخلی تأسیساتی که در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند (مانند کوره‌های مورد استفاده در صنایع شیمیایی و یا زباله‌سوزها) باید بنا به دلایل فنی و ایمنی دارای یک لاینینگ حایل در برابر حرارت باشند. آجرکاری انجام شده باید تا حدی حرارت را به بدنه فولادی منتقل کند که در محدوده تحمل حرارتی فولاد باشد.

آجرهای عایق که مانع خوبی برای انتقال حرارتند، اغلب تخلخل بالایی دارند که باعث کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی (یک دهم مقاومت فشاری) این نوع از آجرها نسبت به آجرهای ضد اسید و نسوز می‌شود.

به طور معمول بین بدنه فولادی و آجرکاری نسوز، یک یا چند لایه از آجرهای عایق حرارتی که باعث افت حرارتی از داخل به خارج می‌شوند، استفاده می‌شود. در صورت استفاده از این آجرها، با این که آجرکاری نسوز داخلی دارای دمای بسیار بالا بوده و در نتیجه به میزان زیادی منبسط می‌شود، بدنه فولادی هم‌چنان خنک بوده و میزان انبساط آن بسیار کم است.

ضریب انبساط آجرهای عایق به نسبت کم است و دمای متوسط آن‌ها بیش‌تر از فولاد است، اما به هر حال بسیار کم‌تر از آجرکاری نسوز است و انبساط آجرکاری نسوز به سمت خارج (یعنی در جهت بدنه که انبساط کم‌تری دارد) خواهد بود. نتیجه این امر یک فشار شعاعی در آجرکاری عایق و هم زمان ایجاد تنش‌های کششی مماسی است.

اگر آجرکاری و یا لاینینگ عایق توانایی تحمل تنش‌های به‌وجود آمده را می‌داشت و نیز می‌توانست حجم خارجی خود را حفظ کند، در آن صورت بدنه فولادی زیر تنش کششی و آجرکاری نسوز زیر تنش فشاری قرار می‌گرفت ولی با توجه به متخلخل بودن آجرهای عایق حرارتی و در نتیجه پایین بودن مقاومت‌های آن‌ها و با توجه به این نکته که این مواد به صورت الاستیک به حالت اولیه خود بر نمی‌گردند، لذا خرد و شکسته می‌شوند.

در صورتی که فضای کافی بین بدنه فولادی و آجرکاری نسوز برای افتادن تکه‌های کوچک شکسته شده از آجرهای عایق وجود نداشته باشد، تا زمانی که تجهیزات به‌طور پیوسته و در همان سطح دما کار می‌کند، لایه عایق هم چنان به‌طور مؤثر باقی خواهد ماند اما در زمان توقف کار تجهیزات و یا به عبارت دیگر در زمان سرد و یا گرم شدن، لاینینگ عایق بین بدنه و آجرکاری‌نسوز، به‌طور کامل می‌افتد و در نتیجه تاثیر لایه عایق از بین می‌رود که در این حالت ممکن است آجرکاری نسوز و در نهایت بدنه تجهیزات صدمه جدی ببیند. ☒