

افزایش راندمان آمپری و کاهش مصرف انرژی با کنترل سوپر هیت

چکیده:

مصرف انرژی یکی از موضوعات کلیدی در تولید آلومینیوم می باشد. از این رو افزایش راندمان آمپری و در عین حال کاهش مصرف انرژی، چالشی بزرگ برای کارخانه های تولید آلومینیوم دنیا بحساب می آید. شیوه ای جدید از موازنه جرم و انرژی ایجاد شده که با موقعیت در مقیاس صنعتی پیاده گردیده است. اساس این روش جدید، اندازه گیری سوپر هیت (فوق ذوب) می باشد. اندازه گیریهای پشتیبان، شامل دمای بت و افت ولتاژ کاتد (افت لاینینگ) می باشد.

راه کار تنظیم ولتاژ دیگ، بعنوان ابزار اولیه کنترل، جهت رسیدن به دمای بتی که از قبل برای دیگ تعریف شده، بکار گرفته می شود. افزودنی آلومینیوم فلوراید بعنوان کنترل کننده ثانویه، برای جابجایی نقطه ذوب می باشد. بواسطه تعادل توامان در موازنه جرم و انرژی، دیگ به پایداری رسیده و مزایایی چون راندمان آمپری بالاتر و کاهش مصرف انرژی را به ارمغان می آورد. راندمان آمپری می تواند با رشیو (Ratio) کربولیت یا بت، پایین تر و دمای بت پایین تر افزایش یابد. اضافه کردن MgF_2 و Li_2CO_3 به داخل بت، راندمان آمپری را افزایش می دهد و باعث پایداری بیشتر لژ کناری می گردد. با این حال تلاش برای رسیدن به راندمان آمپری بالاتر و پایداری بهتر لژ کناری ادامه دارد.

مقدمه:

در دیگهای تولید آلومینیوم بطور مداوم، جریان خط و ولتاژ توسط مونیتورینگ و نمونه گیری و اندازه گیری دوره ای، دمای بت، ترکیب بت و افت ولتاژ کاتد اندازه گیری و کنترل می شوند. گزینه موثر برای هزینه کمتر، جهت دستیابی به منافع بیشتر در راندمان آمپری، از طریق استفاده از روشهای دقیقتر، مطمئن تر و سریعتر نمونه برداری، به همراه تغییر راهبردهای کنترلی، بمنظور کمک در بهینه سازی فرایند می باشد. کارخانه ها برای اندازه گیری دمای بت که هر یک الی دو روز اندازه گیری می شود، از ترمو کوپل های چند بار مصرف نوع K و یا از ترمو کوپلهای یکبار مصرف نوع S استفاده می کنند. در مجموع، ترکیب بت با استفاده از نمونه هایی که هر دو الی چهار روز گرفته می شود، کنترل می گردد. افزودنیهای شیمیایی (آلومینیوم فلوراید و بعضاً کربنات سدیم) بر اساس ترکیب یا دمای تئوری نقطه ذوب اضافه می شوند. ترکیب اصلی بت با آلومینیوم فلوراید و کلسیم فلوراید تغییر می کند. بهر جهت عامل اصلی. در عدم صحت آنالیز بت، روش نمونه گیری و ابزار نمونه برداری می باشد. که اگر ابزار

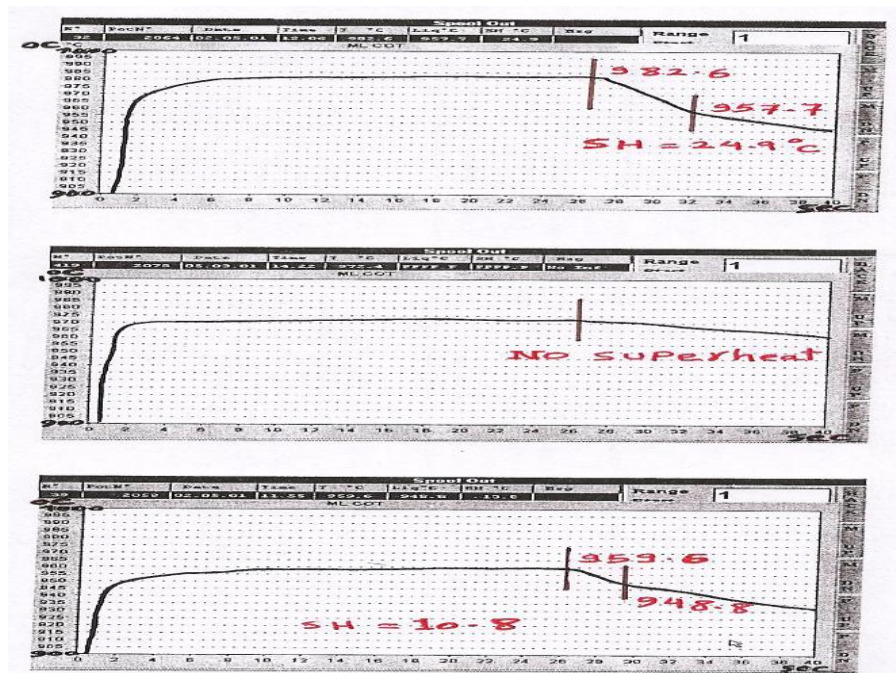
واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

نمونه برداری گرم باشد ، باعث کند شدن آهنک سرد شدن نمونه می گردد که ساختار فیزیکی آن را به کریولیت تغییر می دهد . بدنبال آن تغییر در نتایج آنالیز XRD را خواهیم داشت . اشکال دیگر این روش ، تصمیم گیری برای ترکیب بت می باشد .

در بعضی موارد تأخیری ۶ تا ۱۰ ساعته بین گرفتن نمونه و بدست آوردن آنالیز و وارد کردن اطلاعات به کامپیوتر وجود دارد . طولانی شدن زمان بین نمونه گیری و محاسبات کامپیوتری جهت افزودن مواد شرایط بهینه ، برای ترکیب بت را ایجاد نمیکند

اما پیشرفتهای اخیر در ساخت حس گرهای یکبار مصرف ، اندازه گیری سوپرهیت ، باعث جایگزین شدن این نوع حسگر ها بجای شیوه های سنتی اندازه گیری دمای بت شده و نیاز به گرفتن نمونه بت برای آنالیز نمی باشد. دستگاه کریوترم خریداری شده توسط شرکت المهدی نیز دقیقاً همین کار را انجام می دهد.



واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

اگر سوپر هیت بتواند در حدود 10°C کنترل شود دمای بت در محدوده $955-965^{\circ}\text{C}$ نگه داشته شود، دیگ پایدار می ماند و حل شدن آلومینا به خوبی صورت می پذیرد و راندمان آمپری بالایی برای دیگ خواهیم داشت

تئوری کنترل سوپر هیت

همانطور که بیان شد، دمای ذوب پایین تر می تواند در صد راندمان آمپری را افزایش دهد معمول ترین راه برای کاهش دمای ذوب افزایش نسبت ماده افزودنی AlF_3 است تا رشیو کریولیت یا بت را کاهش دهد. با این حال دمای ذوب پایین تر و نسبت AlF_3 بیشتر، حل شدن Al_2O_3 را مشکل تر می کند.

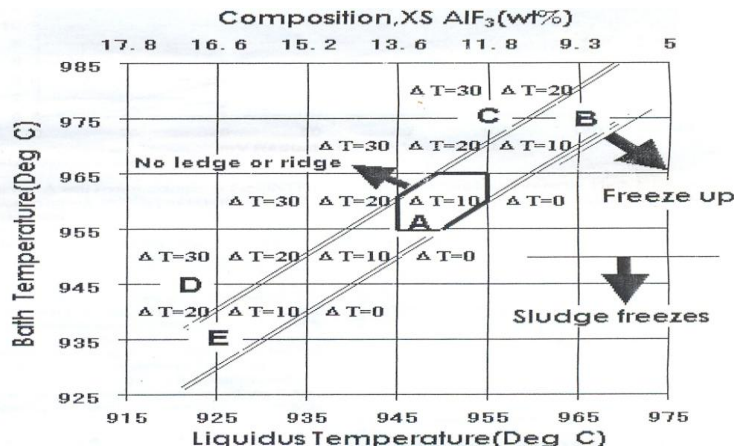
بنابراین تمایل بیشتری برای تشکیل ماک در کاتد به وجود می آید و با استفاده از کنترل تغذیه Al_2O_3 خود تنظیم هوشمند و کنترل دقیق مواد افزودنی مثل AlF_3 ، کنترل جرمی می تواند حاصل شود. علاوه بر این، با بهینه کردن ورودیهای انرژی نظیر انتخاب صحیح ولتاژ هدف و عملیات کاور خوب آنها، تعادل حرارتی می تواند حفظ شود و عملکرد پایدار دیگ را به ما می دهد. با بهینه کردن شیمی بت و تأمین دمای بت به طوری که سوپر هیت ثابت و نسبتاً پایینی فراهم گردد، درصد راندمان آمپری می تواند مرحله به مرحله افزایش یابد. دمای ذوب یک عامل مهم و کلیدی برای فرایند الکترولیز آلومینیوم به حساب می آید و تحت تأثیر تعادل جرمی است. سوپر هیت تفاوت بین دمای بت و دمای ذوب است و به طور مستقیم، بر ذوب شدن یا انجماد لژکناری تأثیر می گذارد.

کنترل خوب سوپر هیت در حقیقت دو تأثیر اصلی دارد.

۱- حفظ لژکناری، که به عنوان حصاری محافظ، برای دیواره های کناری عمل می کند.

۲- حل شدن خوب Al_2O_3 در بت را تضمین می نماید.

پروفیسور "مارک تیلور" روی این موضوع تحقیق کرده و نتایج آن در شکل زیر آمده است.



واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

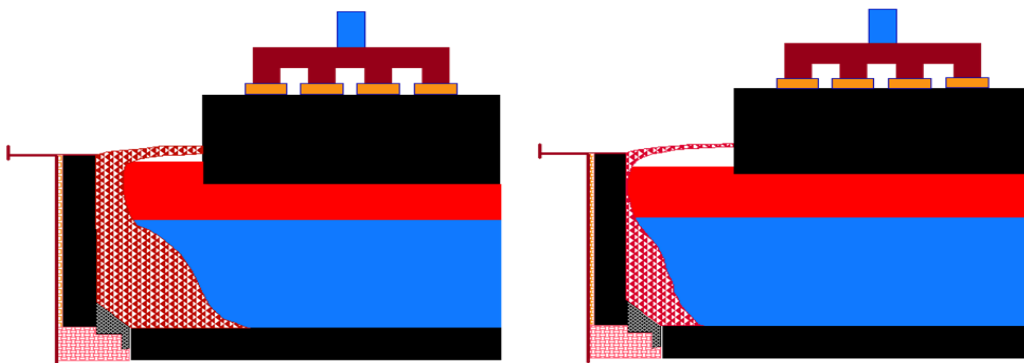
برزو بهاروند

منطقه هدف (منطقه A)

مقدار اضافی AlF_3 بین 11.5 تا 13.5 درصد (رشیو کریولیت 2.1-2.2) و با CaF_2 6% و Al_2O_3 3% در داخل الکترولیت، دمای ذوب بین 945°C تا 955°C است.

مناطق غیر هدف - منطقه های E,D,C,B

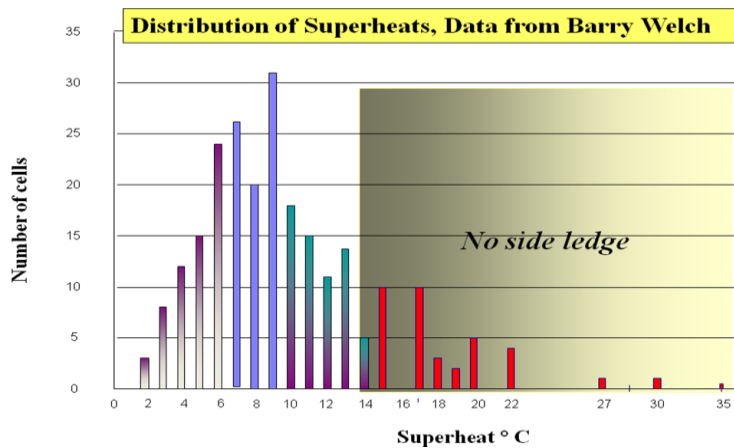
وقتی دمای ذوب در مناطق D,C است، سوپرهیت بیشتر از 15°C است و لژ کناری کم می شود. دیواره های کناری به خوبی محافظت نمی شوند و کاتد خم می شود و بدنه دیگ تغییر شکل می دهد. این مسئله اغلب منجر به شکستگی دیواره های کناری دیگ و ایجاد نقاط قرمز و سرانجام نشتی و سوراخ شدن دیگ می گردد.



ied.

er,

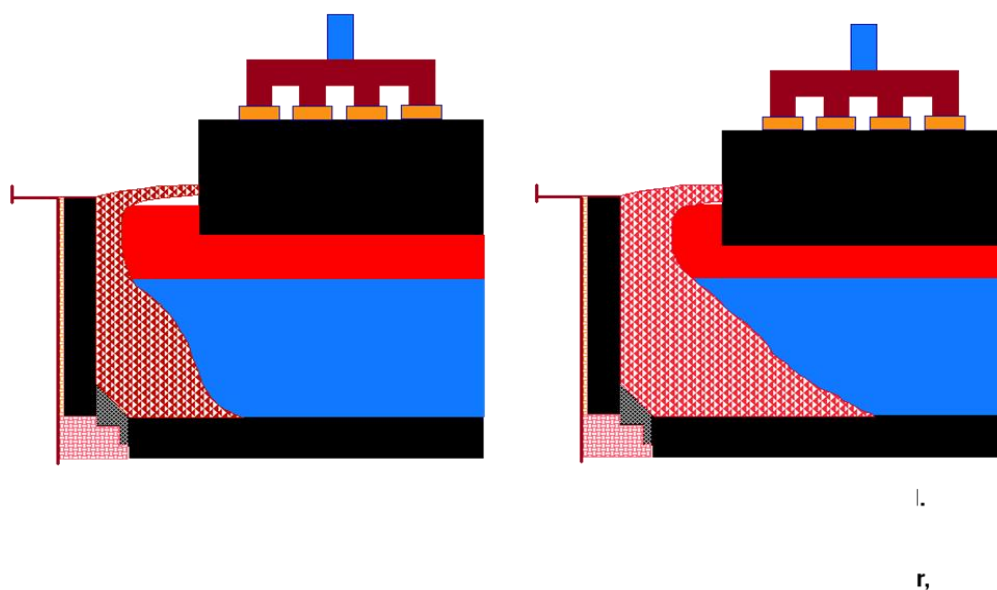
تغییر در سوپرهیت باعث ناپایداری دما سلول می شود
انرژی فراهم شده برای سلول (ولتاژ) افزایش یافته است.
دمابت زیاد شده و سوپرهیت زیاد می شود.
حرارت تلف شده زیاد می شود و ضخامت قسمت بالایی لژ کناری نازک می شود.
و میزان آلومینیوم فلوراید در الکترولیت اندکی کاهش می یابد.



واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

اگر دمای ذوب در مناطق E, B باشد، سوپرهیت کمتر از 15°C و لژکناری می تواند به سادگی شکل گیرد. دمای بت و (ذوب) در منطقه B بالاست بنابراین دیگ راحت قابل کنترل است (بیشتر پایدار است). در منطقه E دمای بت و ذوب پایین است بنابراین پایداری حرارتی ضعیف است و دیگ به راحتی قابل کنترل کردن نیست. حل شدن Al_2O_3 کمتر می شود و تمایل به ته نشین شدن Al_2O_3 در کاتد به وجود می آید که منجر به تشکیل ماک و یخ زدگی کف می گردد. از بین بردن پوششهای سخت (hard crust) که روی کاتد به وجود آمده اند بسیار مشکل است، در کوتاه مدت، شاید دیگ با راندمان آمپری بالاتر کار کند ولی در دراز مدت راندمان آمپری به خاطر طبیعت ناپایدار دیگ کم می شود. تعدادی از محققین برجسته اظهار داشته اند که سوپرهیت پایدار عامل مهمی تری است نسبت به دمای بت و شیمی بت پایدار یعنی اینکه سوپرهیت پایدار بازده جریان بالاتری را به ما می دهد. [3]



انرژی فراهم شده برای سلول (ولتاژ یا آمپراژ) کاهش یافته است.

دمابت کاهش یافته و سوپرهیت کم شده است.

اتلاف حرارت کاهش یافته و قسمت بالایی لژ کناری ضخیم می شود.

و میزان آلومینیوم فلوراید در الکترولیت اندکی افزایش می یابد.

به طور کلی با سوپرهیت کمتر راندمان آمپری بالاتر می رود، به عنوان مثال وقتی سوپرهیت 10°C افزایش می یابد،

راندمان آمپری به میزان 1.2 تا 1.5 درصد کاهش می یابد. نیازمندیهای زیر باید برآورده شود اگر می خواهیم دیگی با

عملکرد پایدار داشته باشیم.

واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

* سوپرهیت را در محدوده هدف نگه دارید تا از شکل گیری ماک و لجن جلوگیری شود و لژ کناری حفظ گردد.

* نگهداری و پایداری ترکیبات شیمی بت در محدوده هدف ، شامل رشیو بت (یا کریولیت) و درصد Al_2O_3

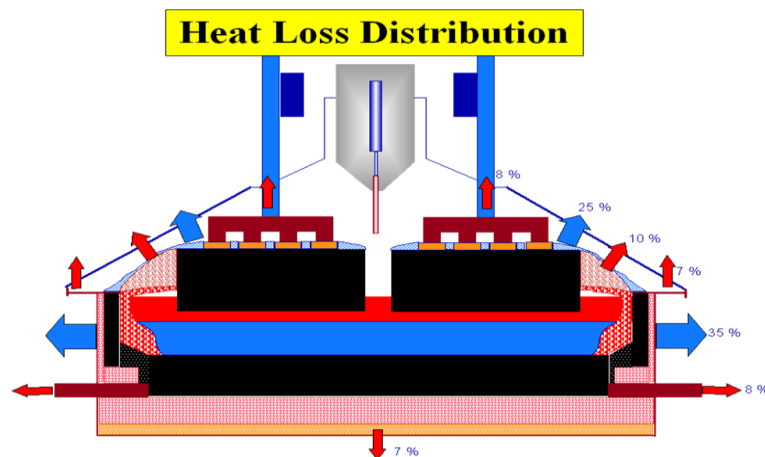
* نگهداری و پایداری بت و سطح فلز بالا

* طراحی دیگ پیشرفته به منظور فراهم آوردن میدان مغناطیسی پایدار برای سطح فلز غیر متلاطم

استراتژی برای کنترل سوپرهیت

یک سیستم کنترل فرآیند تکمیلی جدید ، با استفاده از حس گرها اندازه گیری به دست آمده ، کمک می کند به واحد ذوب تا فرآیند را بهینه و بازده جریان را افزایش دهد، اتلافهای حرارتی ، هزینه های آنالیزی را کم و مصرف کربن را کاهش می دهد. استراتژی کنترلی جدید ، عملکرد دیگ را بهبود می بخشد و شرایط کاری خوبی را فراهم می کند. تعادل حرارتی جدید ، ممکن است با تعادل حرارتی کنونی تفاوت داشته باشد که به تنظیم منظم ولتاژ هدف ، کنترل دقیق ارتفاع فلزی و عملیات کاور روی آندها احتیاج دارد. استراتژی کنترلی جدید بر پایه اندازه گیری های منظم دمای محیط و دمای بت است این استراتژی تعیین می کند که خارج شدن دیگ از کنترل به خاطر انرژی است (تنظیم ولتاژ) . یا بخاطر بعد شیمیایی (تنظیم افزودنی AlF_3)

نیاز های شیمی دیگ (افزودنی AlF_3 یا Na_2CO_3) بر پایه نقطه ذوب اندازه گرفته می شود . تنظیم دمای بت (ورودی انرژی یا تنظیم ولتاژ هدف) بر پایه سوپرهیت اندازه گیری می شود.



اتلاف حرارت در سه ناحیه تقسیم می شود.

اتلاف حرارت در منطقه پائین تاثیر چندانی روی دمای بت ندارد.

منطقه بالایی هم حساسیت چندانی ندارد تنها ضخامت پوشش و مجاری جریان گاز می توانند موثر باشند اتلاف حرارت از دیواره ها کناری بیشترین تغییرات را در دمای بت باعث می شوند.

واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

مدل ریاضی کنترل سوپر هیت

محاسبه دمای ذوب

معادلات ذوب، دمای ذوب را محاسبه کرد. مثال معروف معادله SINTEF است که بیشترین استفاده را دارد [6]

معادله

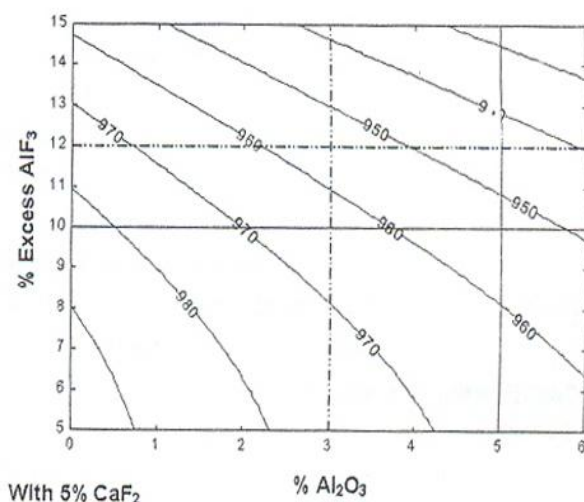
$$T = 1011 + 0.50[AlF_3] - 0.13[AlF_3]^2 - \frac{3.45[CaF_2]}{1+0.0173[CaF_2]} + 0.124[CaF_2][AlF_3] -$$

$$0.00542([CaF_2][AlF_3])^{1.5} - \frac{7.93[Al_2O_3]}{1+0.0936[Al_2O_3]-0.0017[Al_2O_3]^2 - 0.0023[AlF_3][Al_2O_3]}$$

$$\frac{8.90[LiF]}{1 + 0.0047[LiF] + 0.0010[AlF_3]^2} - 3.95[MgF_2] - 3.95[KF]$$

با این حال لازم است تا ترکیب کامل الکترولیت شناخته شود چراکه تمام مواد داخل بت بر دمای ذوب تأثیر می گذارد.

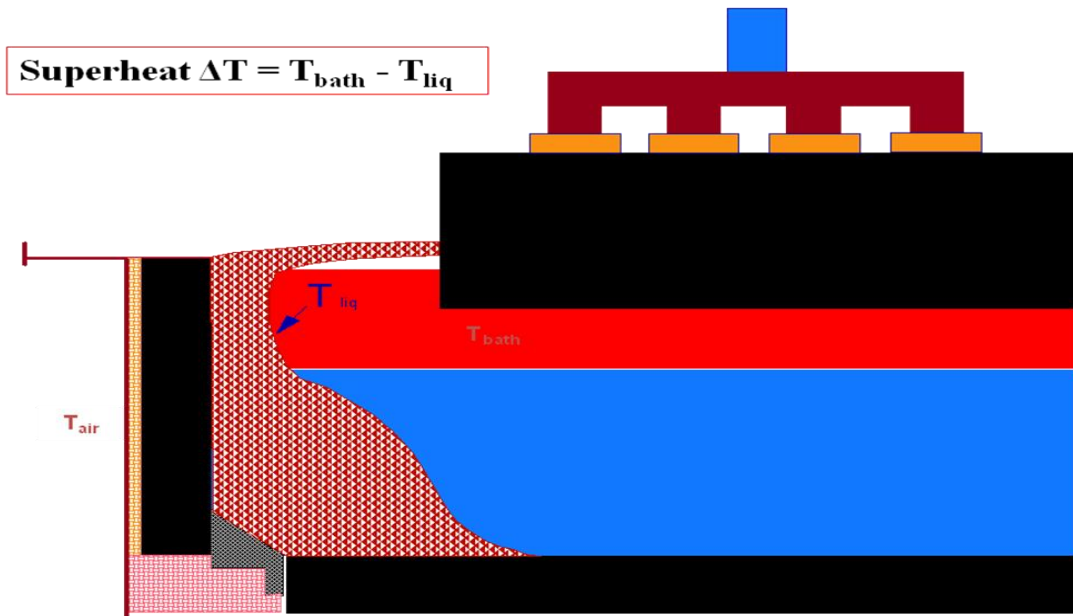
مهمترین عامل نامشخص تغییرات غلظت Al_2O_3 در بت است. با استفاده از معادله داده شده در بالا و بکار رفته در دیاگرام ایزوترمال شکل زیر، ملاحظه می گردد که برای یک ترکیب بت به قرار $12wt\%$ CaF_2 و AlF_3 $5wt\%$ دامنه دمای ذوب حدود 10 درجه سانتیگراد می شود (از 955 تا 945). و این زمانی است که غلظت Al_2O_3 بین 3 تا 5% تغییر کند افزودن AlF_3 به بت، دمای ذوب را کاهش می دهد اما در عمل استفاده AlF_3 به تنهایی در کنترل عملیات دیگ باعث تخمین ضعیفی در دمای ذوب می شود



رابطه ایزوترمال (هم دمای) بین $Al_2O_3\%$ و AlF_3 را نشان می دهد.

واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

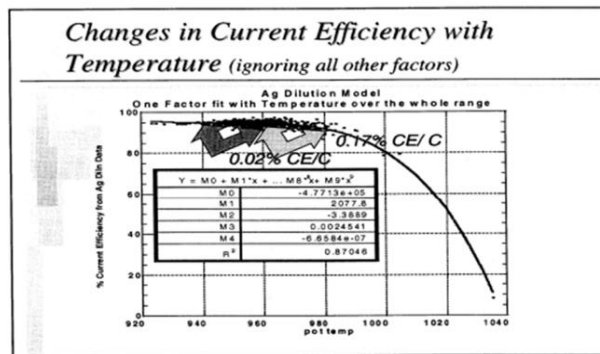


تغییرات در راندمان آمپری (CE) با دما

دما ی بهینه بت در حدود ۹۵۰ درجه سانی گراد است.

هر پنج درجه سانتیگراد کاهش دما یک درصد راندمان آمپری را افزایش می دهد . و در نتیجه به اسیدیتته بالاتر منتهی می شود

From: Gary Tarcy, TMS Industrial Aluminum Electrolysis course, Knoxville, 2005



اضافه کردن آلومینیوم فلوراید

آلومینیوم فلوراید به بت اضافه شده و در آن حل می شود

دما ذوب کاهش می یابد.

سوپر هیت اضافه می شود.

اتلاف حرارت از میان قسمت بالایی دیواره ها زیاد می شود.

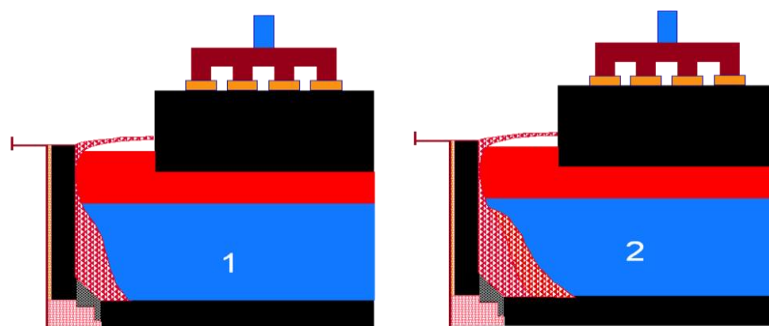
واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

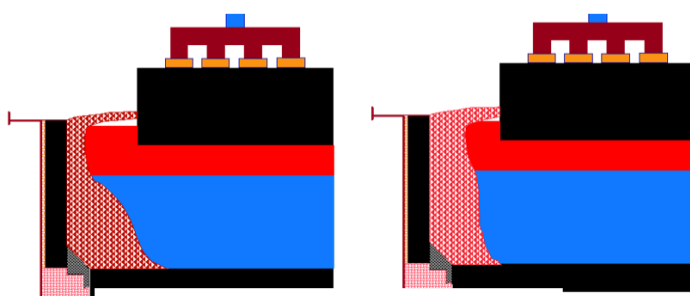
لژ دیواره کناری در قسمت بالا لاغر می شود.

دما بت کاهش می یابد.

ذوب شدن دیواره کناری باعث کاهش میزان آلومینیوم فلوراید می شود.



e



r T_{IIq}

اضافه کردن سودااش Na_2CO_3 موجب افزایش دما ذوب می شود و از این رو سوپر هیت پائین می آید ، قسمت بالایی لژ کناری نتیجتا ضخیم می شود و در حالی که قسمت پائینی لژ کناری لاغر می شود.

اضافه شدن سودااش Na_2CO_3

وقتی که سودااش به بت اضافه می گردد ،

واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

دما ذوب افزایش پیدا می کند.

سوپر هیت کاهش می یابد .

اتلاف حرارت از میان قسمت فوقانی دیواره کناری کاهش می یابد.

ضخامت در قسمت بالایی لژ دیواره کناری زیاد می شود.

دمابت افزوده می شود.

میزان آلومینیوم فلوراید در بت مطمئناً کاهش پیدا خواهد کرد.

علت اصلی از افزودن AlF_3 به بت کاهش دمای ذوب بت است.

چرا همه سلولها برای ثابت نگهداشته شدن ترکیب بت نیاز به اضافه کردن آلومینیوم فلوراید دارند؟

بصورت خاص سرعت مصرف در حدود ۲۰ کیلوگرم به ازای هر تن آلومینیوم تولیدی می باشد (اما بستگی به سلول دارد)

جواب :

به منظور خنثی کردن Na_2O ناخالص که از طریق آلومینا تغذیه شده وارد بت می شود.

بصورت خاص میزان آلومینا ۳۵-۴ درصد وزنی Na_2O دارد.

نکات مهم:

به سلولهایی که سوپر هیت بالا دارند آلومینیوم فلوراید اضافه نکنید.

خصوصاً این کار را در خصوص سلولهایی که پوسته کناری یا شل قرمز دارند انجام ندهید.

با سلولهایی که بصورت پیوسته میانگین دمای بت پائینتر از ۹۵۰ درجه سانتی گراد دارند کار نکنید.

مدل کنترل فرآیند سوپر هیت

سوپر هیت باید به اندازه ای کافی باشد که موجب تجزیه مؤثر آلومینا شود و از به وجود آمدن لجن و ماک جلوگیری کند و

از طرفی نباید آنقدر زیاد باشد که منجر به نیاز انرژی اضافی شود و لژکناری را ذوب و دیواره غیر محافظ شده (لژ کناری

باعث محافظت از دیواره های کناری می شود) را به وجود می آورد و در نهایت باعث کاهش عمر دیگ می شود. اگر

تغییرات در لژ به گونه ای باشد که لژ به طور کامل ذوب شود. دیواره های کناری در معرض فلزو بت ذوب شده قرار خواهد

گرفت و خورگی شروع می شود و سرعت خوردگی به نوع موادی که در سطح داغ استفاده می شوند بستگی دارد. به

عنوان مثال سرعت خوردگی در هر روز برای طرح سلولهای اولیه با دیواره های کناری کربنی 1.3mm است. [16].

ارتباط بین سوپر هیت و لژکناری

علتهای تغییرات دمای بت موارد زیر است : تغییرات ولتاژ، عملیات کاری متغیر (تعویض آند ، تخلیه فلز ، اثرات آندی ،

تغییرات بت، کیفیت Al_2O_3 ، نوسانات آمپری خط، وجود اسپاک های آند و کاور آند [12]. ضمن عملیات ذوب شدن

واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

معمول، دیگها دچار گردش دمای می شوند که به خاطر عوامل فوق الذکر است و این مسئله معمولاً منجر به تغییر در سوپر هیت می گردد چرا که دمای بت به نسبت دمای ذوب واکنش سریع تری به عدم تعادل انرژی نشان می دهد. از آنجایی که تعادل حرارتی به صورت دینامیک است، تغییرات سوپر هیت تأثیر مستقیم بر روی لژ کناری دارد. **بصورت خاص میزان سوپر هیت در سلولهای مدرن پیش پخته ممکن است بین ۵ تا ۱۰ درجه سانتی گراد باشد.** با یک سوپر هیت بالا، بیش از ۱۲ تا ۱۴ درجه سانتی گراد لژ کناری در قسمت فوقانی بسیار نازک است و ممکن است ناپدید گردد. سوپر هیت های پائین ممکن است مشکلاتی برای سرعت حل شدن آلومینا در پی داشته باشد. تنظیم ضخامت لژ حاصل (ذوب یا انجماد) تأثیر مستقیم روی ترکیب بت دارد و بنابراین دمای ذوب هم تأثیر می پذیرد. [13]

ترکیب لژ کناری :

بیش از ۹۶ درصد کریولیت ، ۳ درصد آلومینیوم فلوراید و ۱ درصد کلسیم فلوراید

موارد مهم برای یادآوری

در سلول الکترولیز روابطی وجود دارد میان دما بت _ ترکیب بت _ سوپر هیت _ ضخامت لژ کناری اگر یکی از این پارامترها دگرگون شود دیگری نیز بایستی تغییر کند. این ترکیب روابط برای کارکرد دیگ بسیار مهم است.

موارد مهم دیگر برای یادآوری

سوپر هیت بصورت تفاوت میان دما بت و نقطه ذوب تعریف می شود. سوپر هیت ضخامت لژ کناری در قسمت فوقانی را تعیین می کند. دما بت مقدار لژ کناری در قسمت پائین را تعیین می کند.

موارد مهم دیگر برای یادآوری

قسمت بالایی لژ کناری در جهت خنثی کردن تأثیرات بیرونی تغییر می کند. افزایش آلومینیوم فلوراید (اسیدیته) در الکترولیت ضخامت در قسمت بالایی لژ کناری را کم می کند و لژ در قسمت پائین را افزایش می دهد. سودا اش موجب کم شدن اسیدیته و نتیجتاً باعث کلفتی لژ کناری در بخش بالایی می شود در حالی که ضخامت لایه پائینی لژ کنار را کم می کند.

سوپر هیت بهینه

سوپر هیت بهینه بین ۶ تا ۱۰°C است. و اهمیت حفظ دمای بت ثابت با تنظیم افزودنی AlF_3 برای حفظ دمای بت پایدار و ایجاد تغییرات کوچک بین رشیو بت واقعی و رشیو بت هدف تأکید شده. علاوه بر این خصوصیات آلومینا مورد تحقیق و آنالیز قرار گرفته و بیان شده که خصوصیات و کیفیت Al_2O_3 فاکتور کلیدی برای حل شدن مؤثر آلومینا در داخل بت است. علاوه بر آن ، کیفیت Al_2O_3 بر کل فرایند تأثیر می گذارد [20].

واحد تحقیق و توسعه شرکت آلومینیوم المهدی

برزو بهاروند

تنظیم دقیق آند، وزن فلز تخلیه شده، کاور مناسب روی آند، تغییرات ولتاژی کم، فرکانس آندافکت کمتر، CVD (افت کاتد) پایین تر، نگه داشتن سوپر هیت در محدوده باند هدف (تا لژ کناری پایدار تضمین شود و ماک در کف نداشته باشیم) همه و همه، فاکتورهای اساسی هستند که موجب کاهش مصرف انرژی در تکنولوژیهای جدید می شوند. پایداری دیگ و حل شدن آلومینا برای عملکرد اصلاحی دیگ خیلی مهم است. افزایش AlF_3 باید در محدوده 9-13 درصد باشد. این مقدار برای Al_2O_3 بین 2.4 تا 3 درصد و برای CaF_2 4-5 درصد است. دمای بت در محدوده $958-970^\circ\text{C}$ می باشد. این مسئله به خوبی معلوم شده که مقدار تغذیه Al_2O_3 بر دمای بت تأثیر می گذارد بخصوص در تغذیه زیادی. ولی دمای فلز تحت تأثیر مقدار افزودنی آلومینا قرار ندارد. [23,22,21]

نتیجه گیری

در پروسه الکترولیز آلومینیوم کنترل سوپر هیت باید صورت گیرد و تنها به کنترل دمای بت بسنده نشود سوپر هیت باید در محدوده 6 تا 10°C کنترل شود تا لژ کناری پایداری را شکل دهد و شکل گیری ماک در کاتد را به حداقل برساند. کنترل سوپر هیت خوب، دیگ را پایدارتر می کند و عملکرد واحد ذوب را در راندمان های بالاتر ممکن می سازد و منافع اقتصادی قابل ملاحظه ای با متعهد نمودن پرسنل واحد ذوب آلومینیوم در اجرا و کنترل سوپر هیت قابل دست یابی است

Reference

- [1] Qin Zhu Xian. The principle and application of aluminium electrolysis. The publication press of Chinese mining university.1998
- [2] M.P.Taylor, B.J.welch. Achieving High performance Smelter cell Design. The Zhongxindan aluminium electrolysis tech and application proseminar,Oct.2003.28-31.
- [3] Lin Ye Xiang. The mew idea of theory and practice of aluminium electrolysis CE. The fourth aluminium commission proceeding in 2002 .NanShan,Shandong province, china.May,2002
- [4] Barry Welch. The operation of modern pre-baked anode cells. The Zhongxindan Aluminium electrolysis tech and application pro-seminar,Oct,2003.28-31
- [5] Paul Verstreken, peter white. Heraeus Electronite, Houthalen,Belgium.A new process control strategy for aluminium electrolysis using superheat sensors. Proc 6th Aust AL Smelting workshop 1998
- [6] Solheim A., Rolseth S., Skybakmoen E., Stone L., Sterten A., Store T., Liquidus temperature and alumina solubility in the system $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3\text{-LiF-CaF}_2\text{-MgF}_2$.Light Metals 1995p.451
- [7] K.R.Kloetstra, S.Benninghoff, MA Stam and B.W .Thebes Proceedings 7th Australasian Aluminium Smelting Workshop,2001506-514
- [8] P.M.Entner,Light Metals,1995.227-230
- [9] A.Meghlaoui and N.Aljabri,Light Metals,2003425-429
- [10] Marco A.Stam*and Richard Klosetstra# Devel opment of an advanced process control strategy at Aluminium DELFZIJL .Pro 8th Aust.Al Smelting workshop2004
- [11] Torsten Rieck,Martin iffer,peter white Renu-ka Roding, Rik Kelchtermans. Increased Current Efficiency and Reduced Energy consumption at the TRIMET Smelter Essen using 9Box Matrix control paper presented at TMS Meeting, san Diego, march 2003
- [12] Barry Welch. Contribution to dynamics of pots and relation operation. 6th Australasian Aluminium cell Dvnamics2000
- [13] Fiona J.stevens McFadden, Energy Balance and cell Dynamics: Considerations for cell Design, operation and precess control. Proc 6th Aust. Al smelting workshop 1998
- [14] Aune, F.et al."Thermal effects of anode changing in prebake reduction cells", Light Metals 1996,pp429-435

- [15]Eika,K and skjeggstad, " Heat recovery dynam ic process studies" ,Lidht Metals 1993, pp277-284
- [16]vogelsang,D. "Application of process modeling to improve aluminium production", 6th Australasian aluminium Technology workshop, 1998
- [17]Bian you kang etc. Application of 9 Box Control(Diagnosis cell control) in shenhua 200 KA Pots. Light metals (china version). Jan.2005
- [18]Ren Bi Jun,The superheat 9 box control trial summary report in Luoyang yugang Longquan aluminium smelter 300KA pots. Jun,2006.
- [19]Feng Nai Xiang etc. The tech problem for the long life pot. the proseminar of increasing pot life by chinese nonferrous academy. Oct,2004.
- [20]Amanda M.Taylor.Impact of Bayer process conditions on the characteristics smelter Grade Alumina.proc.8th Aust. Al Smelting workshop 2004.
- [21]M.P>Taylor and B.J.welch. Improved Energy Management for Smelters.Proc.8th Aust. Al Smelting workshop 2004.
- [22]Barry J Welch. The Impact of changes in cell heat Balance Operation on the Electrolyte composition.proc.6th Aust. Al Smelting workshop1998.191-204.
- [23]Daniel whitfield, maria skyllas-kazacos,Barry Welch, peter white. Metal pad Temperatures in Aluminium Reduction cells. Light Metals 2004,239-244.