

اصول تئوریک و مبانی عملکرد سختی گیری الکترونیکی

یوسف سلیم پور

بخش مهندسی الکترونیک و کنترل در حرارت و برودت

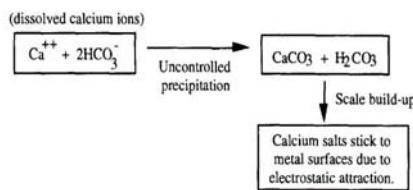
شرکت فرا الکتریک

چکیده

در این مقاله تئوری کارکرد فرایند سختی گیری و رسوب زدایی الکترونیکی مورد بررسی قرار میگیرد. در این روش جهت حذف اثرات مخرب سختی و رسوب باز امواج الکتروموغناطیسی استفاده میشود. در اثر اعمال امواج الکتروموغناطیسی پدیده دانه برفی در آب رخ داده و هسته های اولیه بلورهای رسوب، در آب تشکیل میشود با مرور زمان به حجم هسته های اولیه افزوده شده و بلورهای سخت به صورت ذرات خنثی، در آب معلق شده و دیگر توانایی تشکیل رسوب به دیواره را ندارند. برای بررسی تئوریک این پدیده انرژی آزاد گیپس به عنوان معیار در نظر گرفته میشود، چرا که شواهد نشان میدهد برای شروع فرایند و روند آن کاهش انرژی گیپس اجتناب ناپذیر است، به عبارت دیگر هر فرایندی که منجر به کاهش انرژی آزاد گیپس شود به صورت خود به خودی انجام میشود.

بررسی ها نشان میدهد که انرژی آزاد گیپس در این فرایند، از دو قسمت عمده انرژی آزاد سطحی و انرژی آزاد حجمی تشکیل شده است در این روند انرژی آزاد سطحی همواره مثبت و انرژی آزاد حجمی همواره منفی است. به نظر میرسد که در ابتدا میزان انرژی سطحی بیشتر از انرژی حجمی باشد و لذا این فرایند به شکل خود به خودی انجام نمیشود. نقش اصلی امواج الکتروموغناطیسی تأمین انرژی اولیه جهت برهم زدن معادله تعادلی بوده و با ادامه اعمال امواج فرایند تبدیل یونهای معلق به ذرات خنثی ادامه پیدا میکند به عبارت دیگر امواج الکتروموغناطیس باعث تبدیل یونها به ذرات خنثی در داخل آب میشوند.

آسبیهای فراوانی به تأسیسات حرارتی و برودتی میشود که مهمترین آنها کاهش بازدهی مبدلها و در نتیجه افزایش انرژی راه برده است. آنالیز شیمیایی رسوب نشان میدهد که ترکیب اصلی تشکیل دهنده کربنات کلسیم، سولفات کلسیم، سولفات باریم، سیلیکا و آهن است که در صد فراوانی کربنات کلسیم بیشتر از ترکیبات دیگر می باشد.



۱- در این شکل بلوك دیاگرام چگونگی تبدیل یونهای کلسیم و بی کربنات به رسوب کربنات کلسیم نشان داده شده است این فرایند بصورت غیر قابل کنترل و خود به خود صورت میپذیرد

مقدمه

در سیستم های حرارتی و برودتی مهمترین سیالی که وظیفه انتقال حرارت را به عهده دارد آب است. در برجهای خنک کن، بویلر ها و چیلر ها گردش آب باعث تبادل حرارت میشود. معمولاً آب استفاده شده در کاربردهای حرارتی و برودتی از نوع آب سخت است که باعث پدیدار شدن سختی و رسوب گذاری بر روی سطوح در تماس با آب میشود. تقریباً ۳۰۰۰ سال است که مسئله رسوب و املاح ناخواسته برای انسانها مشکل ساز بوده است و از بدبو یافتن این مشکل در جهت رفع آن معزل کوشیده است، بطوری که اسناد تاریخی خبر از استفاده مصریان از سنگهای کهربایی در مسیر انتقال آب میدهند. در سده گذشته استفاده از مواد مغناطیسی و اثرات آن در حذف رسوب، عنوان روشنی قابل قبول جهت مقابله با سختی آب به کار گرفته شده است. تشکیل رسوب در جدارها و دیوارها باعث

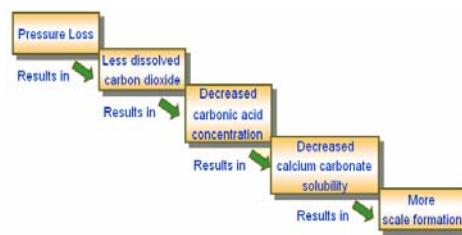
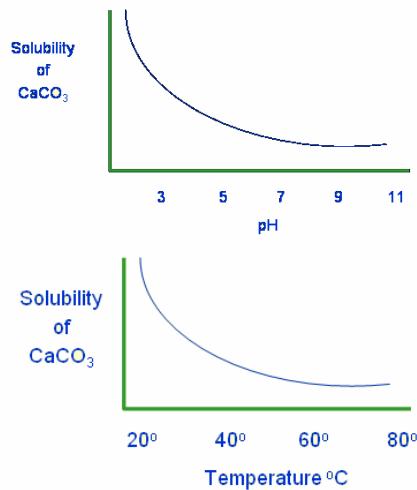
سطوح دانشگاهی و مراکز تحقیقاتی انجام شده است روش‌های الکترومغناطیسی جایگزین مواد مغناطیسی گذشته شده است . همچنین تئوریهای قابل قبولی نیز ارائه شده که این امر چشم انداز بسیار مناسبی برای این تکنولوژی سودمند ترسیم نموده است .

در این مقاله سعی شده است از تئوریهای الکترومغناطیس و اصول و مبانی تشکیل کریستالها فرایند سختی گیری و رسوب زدایی الکترونیکی به شکل تئوریک بررسی شود.

رسوب و عوامل ایجاد آن

تحقیقین معتقدند که بررسی عوامل موثر در تشکیل رسوب، در یافتن روش‌های مقابله با آن بسیار سودمند است . لذا بهتر است رسوب و عوامل ایجاد کننده آن مورد بررسی دقیق قرار گیرد . آنالیز شیمیایی رسوب نشان داده است که عمدۀ ترین مواد تشکیل دهنده آن به ترتیب فراوانی عبارتند از کربنات کلسیم (CaCO_3)، سولفات کلسیم(CaSO_4)، سولفات آهن (Fe_2O_4)، باریم (BaSO_4)، سلیکا (SiO_4) و آهن (C_3 , Fe_2O_4) که در این میان نقش کربنات کلسیم بسیار بارز است، به شکلی که ظاهرفیزیکی رسوبات به رنگ کربنات کلسیم نمایان میشود . یکی از اصلی ترین عوامل وجود املاح فوق در آبهای سخت وجود مقدار فراوان گازکربنیک در هوا است . با عبور قطرات باران از میان جو پدیده بارانهای اسیدی رخ میدهد که این روند با صنعتی شدن جوامع بشری رو به افزونی است . با جاری شدن آبهای اسیدی در میان سنگهایمعدنی مقدار زیادی از املاح فوق در آنها حل شده و آبهای سخت را تشکیل میدهد . زمانی که آبهای سخت وارد سیستم های صنعتی یا مصارف خانگی میشود در اثر سه عامل مهم ، سختی آنها تبدیل به رسوب میشود ، این سه عامل عبارتند از دمای آب ، اسیدی و یا قلیایی بودن آب و فشار آب . در این میان نقش عامل اول بسیار بارزتر نمایان میشود . اثر این سه عامل را نشان میدهد بطوری که با افزایش دما ، حلایقت املاح در آب کاهش پیدا کرده و بصورت رسوب نمایان میشوند که دلیل اصلی

مقاومت حرارتی کربنات کلسیم بسیار زیاد بوده و در صورت تشکیل رسوب در دیواره ها نقش یک عایق را بازی میکند که این امر نقش بسزایی را در کاهش بازدهی مبدل‌های حرارتی دارد . اگر بتوان از تشکیل کربنات کلسیم در جداره مبدل‌های حرارتی جلوگیری کرد روند کاهش بازدهی با گذشت زمان متوقف میشود .



۲- در این شکل میزان حلایقت املاح با تغییر پارامترهای مختلف به ترتیب اسیدیته ، دما و فشار نشان داده است .

تا کنون روش‌های مختلفی برای مقابله با این مسئله پیشنهاد شده است که یکی از موثرترین آنها استفاده از سختی گیری و پالایش الکترونیکی آب است علی رغم کیفیت کارکردی مناسب و مزایای فراوان به علت ضعف در تحلیل عملکرد از دیدگاه تئوری های فیزیکی و شیمیایی نفوذ آن در بازارهای تجاری چشمگیر نبوده است . اما در چند سال گذشته با تحقیقات وسیعی که در

انرژی حجمی و انرژی سطحی تعریف میشود که رابطه آن بصورت زیر تعریف میشود.

$$\Delta G = (\text{nucleation}) = \Delta G(\text{bulk}) + \Delta G(\text{surface})$$

انرژی حجمی از رابطه زیر به دست میاید:

$\Delta G(\text{bulk}) = -jkT(a/a_0) = -4/3\pi r^3 \Delta G_v$

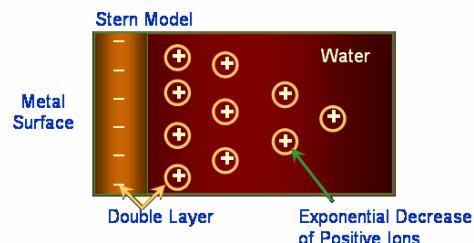
که در آن j تعداد ملکول در هسته، k_0 ضریب ثابت ΔG_v ، T دمای مطلق، r شاعع هسته و a/a_0 انرژی آزاد تبدیل در واحد حجم است نسبت رابطه نسبی بین فرایند واقعی و فرایند تعادل است این رابطه را میتوان بصورت درجه فوق اشباع در نظر گرفت. رابطه ($\Delta G(\text{bulk})$) همواره منفی است و به عنوان عاملی جهت پیش برد خود به خودی فرایند تلقی میشود.

Compared items	Calcite	Aragonite
Specific Gravity	2.71	2.94
Adhesiveness	less-adherent to pipe & heating surface	adherent to pipe & heating surface
Crystal Form	Hexagonal	Orthorhombic
Visualization through Microscope	Round shape	Needle shape
Carbonate layer orientation (side view)	CO ₃ groups in same direction	CO ₃ groups in opposite directions
Carbonate layer orientation (top view)	CO ₃ groups in same direction	CO ₃ groups in opposite directions

۴- در این شکل کربنات کلسیم در صورت های کلسیت و آرگونیت از نظر چسبندگی، شکل کریستال، وضعيت میکروسکوپی و جهت گیری لایه ای مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

این انرژی در حین فرایند تشکیل کریستال، آزاد شده و مقدار کاهش انرژی حاصل از تشکیل

آن خارج شدن گاز CO₂ از آب با افزایش دمای آن است. همچنین اگر اسیدیته آب کاهش پیدا کند مقدار حلایت آب کاهش پیدا کرده و املاح رسوب میانند و در نهایت اگر تغییرات فشار زیاد به فشار کم بطوریکه فشار آن از مقدار فشار زیاد به فشار کم تغییر کند بعلت خارج شدن گاز کربنیک حل شده در آب خاصیت اسیدی آب کاهش پیدا کرده در نتیجه رسوب تشکیل میشود. تشکیل رسوب بالا باشد مانند بویلر ها و مبدل های حرارتی با دمای بالا، تقریبا ۸۰٪ مواد تشکیل دهنده از آرگونیت و تنها ۲۰٪ آن کلسیت است به همین علت در چنین مواردی مشکلات ناشی از رسوب بسیار جدی است. مشخصات فیزیکی کربنات کلسیم را در حالات کلسیت و آرگونیت نشان میدهد.



۳- در این شکل تغوری تشکیل رسوب بصورت یکنواخت در کنار سطوح در تماس با دیواره ها نشان داده شده است.

مبانی تئوریک

برای درک فرایند سختی گیری الکترونیکی از مفهوم انرژی لازم جهت هسته زایی و تبدیل یونهای محلول در آب رسوب استفاده میشود. برای این منظور در فرایند های رسوب گذاری متجلانس و غیر متجلانس باید مفهوم انرژی آزاد گیپس را در نظر بگیریم. انرژی آزاد گیپس از تفاضل انرژی گرمایی شکل دهنده ماده و حاصلضرب دما در آنتروپی بدست میآید معمولاً فرایند های خود به خود مانند فرایند رسوب گذاری به نحوی صورت می پذیرد که میزان انرژی آزاد گیپس کاهش یابد انرژی گیپس در فرایند هسته زایی و رسوب گذاری بصورت مجموع

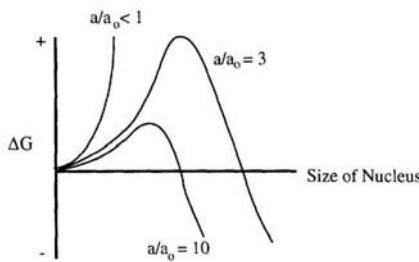
هسته های اولیه از رابطه زیر به دست می آید.

$$J(\text{Rate of Nucleation}) = A \exp\left[\frac{-\Delta G}{kT}\right] = A \exp\left[\frac{-16\pi\gamma^3v^3}{3k^3T^3(\ln S)^3}\right]$$

با توجه به رابطه فوق به نظر میرسد که نرخ رشد هسته اولیه به چهار عامل اصلی وابسته است که عبارتند از ضریب فرکانس (A)، دمای مطلق (T)، انرژی بین لایه ای (γ) و درجه فوق اشباع (a/a_0) که به عنوان مثال ضریب J برای کربنات کلسیم صفر است

اصول سختی گیری الکترونیکی

در این تکنولوژی از امواج الکترومغناطیسی بعنوان مانعی جهت جلوگیری از تشکیل رسوب بر دیواره سطوح حامل آبهای سخت استفاده میشود. انتقال امواج الکترومغناطیسی به داخل لوله های حاوی آبهای سخت از یک سیم پیچ که به دور لوله پیچیده میشود، استفاده میگردد.



۶- در این شکل تغییرات انرژی آزاد گیپس نسبت به سایز هسته های بلور و کمیت نسی فوق اشباع رسم شده است

بنابراین آمپر در صورت عبور جریان الکترونیکی از سیم پیچ میدان مغناطیسی مناسب با آن در میدان الکتریکی متناسب با تغییرات میدان به دست می آید.

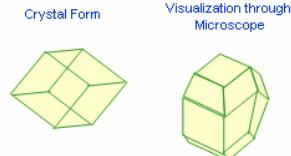
کربنات، در نظر گرفته میشود. انرژی سطحی را

میتوان به صورت زیر تعریف کرد:

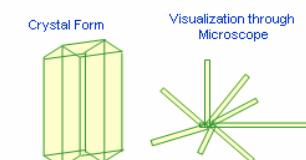
$$\Delta G(\text{surface}) = 4\pi r^2 \gamma$$

که در آن γ تنش بین سطحی را نشان میدهد $\Delta G(\text{surface})$ انرژی لازم جهت ساخت هسته را نشان میدهد و علامت آن همیشه مثبت میباشد. در ابتدا فرایند هسته زایی و تشکیل رسوب تعداد مولکولهای موجود در هر هسته اندک بوده و انرژی سطحی آن از انرژی حجمی آن بیشتر بوده لذا انرژی گیپس این فرایند مثبت بوده و به صورت خود به خود صورت نمی پذیرد مگر آنکه انرژی خارجی که به سیستم وارد میشود با انرژی اندازه کربنات‌ها مقدار انرژی کاهش یافته و به سمت منفی شدن حرکت میکند لذا فرایند بصورت خود به خود نیز ادامه پیدا میکند. در تاثیر سایز هسته ها و درجه فوق اشباع در تغییرات میزان انرژی گیپس نشان داده شده است.

Calcite
Specific Gravity 2.71



Aragonite
Specific Gravity 2.94

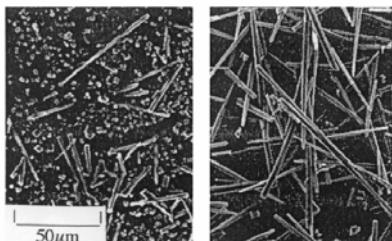


۵- در این شکل ساختار فیزیکی بلورهای کلسیت و آرگونیت مقایسه شده است. همانطور که شکل نشان میدهد جرم حجمی آرگونیت بیشتر از کلسیت است

به این ترتیب برای اینکه این فرایند توانایی تشکیل خود به خود را داشته باشد نیاز به انرژی فعال کننده خارج دارد که با اعمال این انرژی و تشکیل هسته های اولیه دیگر نیاز به انرژی خارجی نبوده با کاهش انرژی گیپس این فرایند ادامه پیدا میکند نرخ رشد

وظیفه تولید موج پیچیده و الکترومغناطیسی را به عهده دارد و یک سیم پیچ که وظیفه انتقال این موج را به سیال دارد تشکیل شده است. امواج الکترومغناطیسی به نحوی عمل میکنند که باعث جذب یونهای مخالف به سمت یکدیگر شده و تشکیل ذرات خنثی را میدهند.

مبانی رسوب زدایی الکترونیکی
اگر روش الکترونیکی را با روشهای معمول در صنعت مقایسه کنیم برتی های فراوانی را مشاهده خواهیم کرد. یکی از مهمترین وجوده تمایز سختی گیری الکترونیکی خاصیت رسوب زدایی آن است که این ویژگی تقریباً منحصر به فرد بوده و در هیچ یک از روشهای معمول چنین پدیده ای مشاهده نمی شود. با توجه به این ویژگی در صورت استفاده از سختی گیر الکترونیکی با گذشت زمان نه تنها رسوب تشکیل نمیشود بلکه رسوب های قبلی نیز به مرور زمان از بین میروند.



۱- در این شکل آب سخت قبل و بعد از سختی گیری الکترونیکی نشان داده شده است. شکل و اندازه بلورهای کربنات کلسیم تغییر فاحشی پیدا کرده است.

برای تحلیل عملکرد رسوب زدایی لازم است که ساختار مولکولی آب مورد توجه بیشتر قرار گیرد. ملکولهای آب ذراتی دو قطبی هستند اتم اکسیژن با جذب الکترونهای باند کوالانت خاصیتی

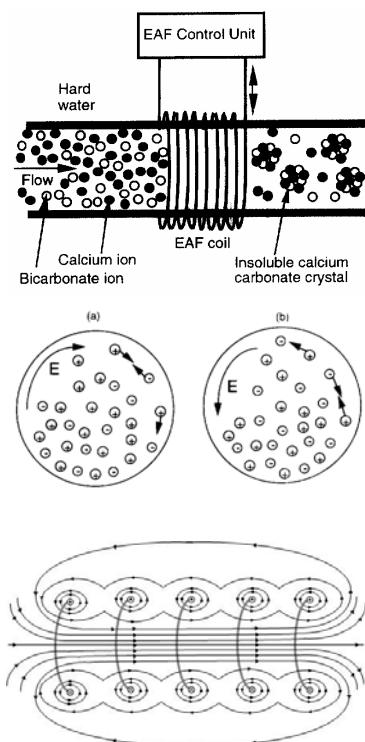
که در فرمولهای ذیل میتوان میزان میدان موجود در سیم پیچ و میدان الکتریکی ناشی از آن بنا به قانون القاء فاراده محاسبه شده است.

$$dB = \frac{\mu_0 (nidz)}{2[R^2 + (Z-d)^2]^{3/2}}$$

$$B = \mu_0 ni$$

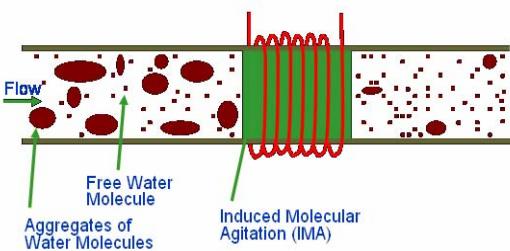
$$\int E_0 dS = -\partial / \partial t \int B_0 dA$$

میدان الکتریکی القاء کننده باعث حرکت یونها مثبت و منفی نسبت به یکدیگر شده باعث ایجاد ذرات خنثی معلق در آب میگردد با تشکیل این هسته های کوچک پدیدهای به نام اثر دانه برخی رخ میدهد که باعث جذب یونهای معلق دیگر در آب شده و هسته های اولیه رشد پیدا میکنند. عکس های گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونیکی این پدیده را به خوبی نمایان میکند.



۷- در این شکل اجزای یک سیستم سختی گیر الکترونیکی نمایش داده شده است. همانطور که شکل نشان میدهد این سیستم از یک بخش الکترونیکی که

متغیر با زمان باعث ایجاد میدان الکتریکی متغیر با زمان و به تبع آن وارد شدن نیرو به مجموعه ای از مولکولهای آب که تشکیل پیوند هیدروژنی داده اند میشود. در صورتیکه فرکانس تحریک با فرکانس رزونانس این هسته های تشکیل شده از مولکول آب برابری کند، پیوند هیدروژنی شکسته شده و درصد مولکولهای آزاد آب افزایش پیدا میکند. با افزایش فراوانی مولکولهای آزاد آب، خاصیت حلایت به شدت افزایش پیدا کرده و آب شروع به حل کردن رسوبهای پیشین موجود در دیواره ها میکند، به این ترتیب فرایند رسوب زدایی به مرور زمان تکمیل تر میشود



^۹- در این شکل خاصیت رسوب زدایی بصورت شماتیک نشان داده شده است. با ایجاد میدان مغناطیسی و پشتنه های تشکیل شده از مولکولهای آب شکسته شده و تبدیل به مولکولهای مجرای آب میگردند

منفی پیدا کرده و نقش قطب منفی را بازی میکند در حالی که اتمهای هیدروژن با داشتن هسته مثبت تنها یک الکترون در گردش دارد لذا هنگامیکه الکترون آن در باند کوالانت توسط اتم اکسیژن جذب میشود خاصیت مثبت پیدا کرده و نقش قطب مثبت دو قطبی را بازی میکند. به همین دلیل مولکولهای دو قطبی آب یکدیگر را از طرف قطبهای مخالف جذب کرده و تشکیل پیوندهای هیدروژنی یا نیروی واندروالس را میدهند. اشکال سختی آب وابسته به همین پیوند میباشد در فاز بخار این پیوند بسیار ضعیف است در حالیکه در فازهای مایع و جامد این پیوند به ترتیب متوسط و قوی است. هنگامیکه یک نمک در آب حل میشود همین خاصیت دوقطبی بودن باعث تجزیه نمک به یونهای مثبت و منفی و جذب و احاطه آن توسط مولکول آب میشود به این فرایند حل شدن در آب یا هیدراته شدن می گویند هرچه تعداد مولکولهای آزادی که کمتر در پیوند هیدروژنی شرکت کرده باشند بیشتر باشد خاصیت هیدراته شدن بیشتر بوده و حلایت آب بالاتر میرود. در صورتیکه از سختی گیر الکترونیکی استفاده شود به دو دلیل حلایت آب افزایش پیدا میکند. اولاً با تشکیل کریستالهای خنثی فراوانی مولکولهای آزاد آب بیشتر میشود زیرا مولکولهایی که در گیر فرایند حلایت یا هیدراته شدن بوده اند، آزاد میشوند علت دیگر افزایش درصد مولکولهای آزاد در اثر میدان مغناطیسی متغیر با زمان است. میدان مغناطیسی