

سمپوزیوم فولاد ۸۲

۲۸ و ۲۹ بهمن ماه ۱۳۸۲

یزد، بافق- شرکت سهامی خاص معادن سنگ آهن مرکزی ایران

سینتیک انحلال نیتروژن در آلیاژ Ni-46%Cr

خطیب الاسلام صدرنژاد^۱، مهدی جنتی^۲

۱-استاد ۲-دانشجوی کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف، شرکت مهندسی مواد کاران

چکیده

آلیاژهای مقاوم به حرارت و خوردگی در صنعت نفت کاربردهای ویژه و فراوانی دارد. این آلیاژها بر پایه آهن، نیکل و یا کروم می باشند. از جمله این آلیاژها، آلیاژ 50Ni-50Cr میباشد که معمولاً جهت بدست آوردن درصد افزایش طول بیشتر میزان نیکل بیشتر در نظر گرفته می شود. در ساخت این آلیاژها و به هنگام آلیاژسازی بدلیل اینکه کروم با افزایش دما شروع به جذب نیتروژن کرده و درصد نیتروژن جذب شده خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ را به شدت تحت تاثیر قرار میدهد، لذا کنترل جذب نیتروژن در این آلیاژ بسیار مهم به نظر می رسد. در این پژوهش منحنی های جذب نیتروژن توسط مذاب آلیاژ Ni-46%Cr بر حسب زمان در دودمای ۱۴۵۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد بر اساس مشاهدات تجربی ترسیم و سپس ضریب انتقال جرم نیتروژن در مذاب این آلیاژ در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد بر اساس تئوری لایه مرزی محاسبه گردید.

مقدمه

بر اساس اطلاعات ارائه شده در مقالات در آلیاژ 50Ni-50Cr با افزایش درصد نیتروژن بیش از 4000ppm، فاز نیتریدی Cr_2N تشکیل خواهد شد و تا قبل از آن فاز نیتریدی مشاهده نمی شود [۱]. ساختار آلیاژ 50Ni-50Cr دارای دو ساختار α (غنی از کروم) و γ (غنی از نیکل) می باشد. نیتروژن جذب شده در این آلیاژ بر روی ساختار آن تاثیر بسزایی دارد و با افزایش نیتروژن جذب شده در آلیاژ فاز α تشکیل شده کاهش یافته و با داشتن مقادیر بیشتر از 4000ppm نیتروژن، ذرات α دیگر در آن مشاهده نمیشود و بنابراین استحکام تسلیم آن در حضور نیتروژن به مقدار ورق افزایش و بعد از آن بدلیل تشکیل فاز Cr_2N استحکام کم می شود. ولی در حالت ریختگی شده اولیه در مقادیر کمتر نیتروژن درصد ازدیاد طول افزایش و در مقادیر بیشتر نیتروژن، نیز به دلیل تشکیل فاز Cr_2N درصد افزایش طول (EI%) کاهش خواهد یافت [۱]. موضوع جذب نیتروژن در فولادهای پر کروم، فولادهای زنگ نزن و سوپر آلیاژی که حاوی مقادیر زیادی کروم می باشند، بسیار حائز اهمیت می باشد و از دهه ۶۰ میلادی به بعد محققان متعددی در زمینه ترمودینامیک انحلال نیتروژن در اینگونه مواد فعالیت‌های بسیاری را انجام داده اند. در واقع هنگامی که دمای کروم از ۸۰۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد، کروم شروع به جذب نیتروژن می کند [۱] و در نتیجه به هنگام ذوب شدن نیتروژن وارد مذاب می شود. پارامترهایی مانند دما و ترکیب آلیاژی بر روی جذب نیتروژن تاثیر بسیاری می گذارند. بطور مثال در تحقیقات Wada آلیاژهای مختلفی از جمله آلیاژهای Fe-Ni، Fe-Cr، Fe-Ta، Cr-Ni، Fe-Ta، Cr-Ni، Fe-Ni-Ta، Fe-Cr-Ta و آلیاژهای بر پایه Fe-Cr-Ni که حاوی Ti، Ta، Mo و Mn هستند مورد مطالعه ترمودینامیکی گرفته است و کلیه این آزمایشها بر اساس یک اصول ترمودینامیکی بناگذاری شده اند. [۲-۵]

در حضور عنصر نیتريد زانظير تیتانيم ویا تانتاليم برای اندازه گیری نیتروژن باید نمونه کوچکی از آن در دمای بالاتر از نقطه ذوب (حدود ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد) و تحت شرایط خلاء ذوب شود تا گاز موجود در آن خارج و آنالیز گردد. به عنوان مثال آلیاژهای Fe-15%Ta و Fe-20%Ta از این شرایط پیروی می کند. بنابراین باید قبل از آنکه آنالیز گاز نیتروژن را برای یک نمونه انجام دهیم باید قانون سیورت را در مورد آن اجرا کنیم. چنانچه نیتروژن موجود در نمونه ما در آن دما (مثلاً ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد) تا فشار معینی از قانون سیورت پیروی کند، نتیجه خواهیم گرفت که گاز موجود در فلز به صورت حل شده خواهد بود و به صورت ترکیب با عناصر نیتريد زانمی باشد. در صورتی که نیتروژن حل شده در مذاب از قانون سیورت پیروی نکند، معادلات حاکم بر سیستم به شکل دیگر خواهند بود. برای مثال در آلیاژ Fe-Cr-Ni-Ti بدلیل وجود تیتانيم و جذب نیتروژن، تشکیل TiN در فشار نیتروژن زیر یک اتمسفر را خواهیم داشت. لذا از این روش نمی توان جهت اندازه گیری نیتروژن استفاده کرد. شکل (۱) نمودار درصد وزنی نیتروژن بر حسب جذرفشار نیتروژن جهت آلیاژ Fe-Cr-Ni-Ti را نشان می دهد [۳]. در آلیاژ نیکل - کروم نیز در غلظتهای کروم مختلف این آزمایش انجام شده است. در شکل (۲) نمودار حلالیت نیتروژن بر حسب جذرفشار نیتروژن در مذاب نیکل - کروم در دمای ۱۷۷۳ درجه کلون در غلظتهای کروم مختلف رسم شده است [۶].

راجع به ترمودینامیک جذب نیتروژن در آلیاژ نیکل - کروم پژوهشهای متعددی انجام شده است، ولی در زمینه سینتیک آن فعالیت چندانی صورت نگرفته است. چون گاز نیتروژن در تعادل با مذاب می باشد خواهیم داشت:

$$1/2N_2(g) = [N]_{Alloy} \quad (1)$$

با استفاده از استاندارد یک درصد وزنی خواهیم داشت:

$$\Delta G_N^a = -RT(\ln(wpctN)_{Alloy} / P_{N_2}^{0.5}) \quad (2)$$

ΔG_N^a ، انرژی آزاد استاندارد حل شدن نیتروژن در آلیاژ چند جزئی می باشد.

$$\Delta G_N^a = \Delta H_N^a - T\Delta S_N^a \quad (3)$$

واز طرفی داریم:

$$\Delta G_N^o = \Delta H_N^o - T\Delta S_N^o \quad (4)$$

که در آن ΔG_N^o انرژی آزاد استاندارد حل شدن نیتروژن در آهن خالص و یا فلز پایه خالص می باشد. به عنوان مثال انرژی استاندارد حل شدن نیتروژن در آهن خالص با محاسبات تجربی به صورت رابطه زیر ارائه شده است. [۳]

$$\Delta G_N^o = (4720 \pm 1050) + (23.4 \pm 0.59) T \text{ j/g-atomN}$$

با فرض $P_{N_2} = 1$ و با توجه به اینکه:

$$\frac{d(\Delta G_N^a / T)}{d(1/T)} = \Delta H_N^a = -R \left(\frac{d \ln(wpctN)_{Alloy}}{d(1/T)} \right) \quad (5)$$

بنابراین با عنایت به رابطه فوق می توان فهمید که با رسم نمودار لگاریتم درصد وزنی نیتروژن بر حسب معکوس دما که دما بر حسب درجه کلوین می باشد، می توان از روی شیب نمودار، مقدار آنتالپی و سپس آنتروپی را با استفاده از رابطه های (۲) تا (۵) محاسبه کرد. شکل (۴) نمودار درصد وزنی نیتروژن بر حسب معکوس دما در آلیاژهای آهن - نیکل و نیکل - کروم و جدول (۱) مقادیر محاسبه شده آنتالپی و آنتروپی در آلیاژهایی با درصدهای مختلف آهن، کروم و نیکل و همچنین شکل (۳) نمودار درصد وزنی نیتروژن بر حسب درصد کروم در آلیاژ نیکل - کروم را نشان می دهد [۳]. اگر چنانچه استاندارد مبنای ما استاندارد یک درصد وزنی باشد، خواهیم داشت:

$$\Delta G_N^a = \Delta G_N^o + RT \ln a_N \quad a_N = f_N \cdot [\%WpctN] \quad (6)$$

واز رابطه فوق نتیجه خواهیم گرفت که ضریب اکتیویته نیتروژن ($R=8.314 \text{ J/mol.K}$) برابر است با:

$$\log f_N = \frac{1}{19.44T} (\Delta G_N^a - \Delta G_N^o) \quad (7)$$

رابطه دیگر برای ضریب اکتیویته این چنین است:

$$\log f_N = \sum e_N^i(pcti) + \frac{1}{2} \sum e_N^{ii}(pcti)^2 + \quad (10)$$

$$\sum^{(i,j)} p_N^{ij}(pcti.pctj) \quad (8)$$

و بنابراین از رابطه (۸) جهت آلیاژ دوتایی نیکل - کروم خواهیم داشت:

$$\log f_N = e_N^{Cr} (\%Cr) + r_N^{Cr} (\%Cr)^2 \quad (9)$$

و یا به عبارت دیگر:

$$\log(\%N) = \log a_N - e_N^{Cr} (\%Cr) - r_N^{Cr} (\%Cr)^2 \quad (10)$$

با استفاده از رگرسیون در نمودار شکل های (۷) و (۸) و تبدیل آن به نمودار لگاریتمی از رابطه (۱۰) خواهیم داشت: [۵]

$$\log(\%N) = -2.7273 + 0.0870(\%Cr) - 0.0006(\%Cr)^2 \quad T=1773 \text{ K} \quad (11)$$

$$\log(\%N) = -2.7871 + 0.0870(\%Cr) - 0.0006(\%Cr)^2 \quad T=1873 \text{ K} \quad (12)$$

اگر به جدول (۲) مراجعه شود، می توان نمودار آنتالپی و آنتروپی را بر حسب درصد کروم رسم کرده و با بدست آوردن نمودار آنها، میزان آنتالپی و آنتروپی را در مقدار ۴۶ درصد وزنی کروم از روی معادله تخمین زد. و بنابراین آنتالپی آلیاژ Ni-46%Cr بر اساس معادله حاصل $77588.47/47 \text{ J/g-atomN}$ خواهد بود. همچنین نمودار تغییرات آنتروپی آلیاژ نیکل - کروم بر حسب درصد کروم را می توان از روی جدول (۱) رسم کرد و بر همین اساس میزان آنتروپی آلیاژ Ni-46%Cr به صورت تخمینی $42/85 \text{ J/K, g-atomN}$ خواهد بود.

بنابراین ΔG_N^a طبق رابطه (۳)، با قراردادن آنتالپی و آنتروپی محاسبه شده در این آلیاژ به صورت رابطه (۱۴) در می آید.

$$\Delta G_N^a = -77588.47 + 42.85T \text{ (J/g-atomN)} \quad (13)$$

بنابراین در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد، انرژی آزاد انحلال نیتروژن در این آلیاژ، $3757/92 \text{ J/g-atomN}$ خواهد بود.

$$\Delta G_N^a = -RT \ln K_{eq} \quad \text{از طرفی می دانیم:}$$

$$K_{eq(1723 \text{ K})} = 1.299, \quad K_{eq(1773 \text{ K})} = 1.115 \quad \text{و بنابراین خواهیم داشت:}$$

بر اساس تئوری لایه مرزی اگر گاز با سطح مذاب به تعادل رسیده، و خواهیم تغییرات غلظت نیتروژن را

بر حسب زمان بدست آوریم، آنگاه خواهیم داشت: [۷]

$$V_m \cdot \frac{d(a_N)}{d(t)} = A \cdot J_N = A \cdot D \cdot \frac{a_N^{(g)} - a_N}{\delta} = K \cdot A \cdot \frac{a_N^{(g)} - a_N}{1} \quad (14)$$

در این معادله، V_m حجم مذاب ر حسب سانتیمتر مکعب، A سطح مذاب در تماس با گاز بر حسب سانتیمتر مربع، δ ضخامت لایه مرزی بر حسب سانتیمتر، a_N اکتیویته نیتروژن در مذاب، J_N فلاکس نیتروژن عبوری از سطح مذاب بر حسب $\left(\frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Sec}}\right)$ ، K ضرب انتقال جرم بر حسب $\left(\frac{\text{cm}}{\text{Sec}}\right)$ ، t زمان

برحسب Sec ، $a_N^{(g)}$ اکتیویته نیتروژن در فاز گازی در تعادل با مذاب و D ضریب دیفوزیون نیتروژن در مذاب برحسب $\left(\frac{cm^2}{Sec}\right)$ می باشد. با استفاده از رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$\int_{a_{N_0}}^{a_N} \frac{d(a_N)}{a_N^{(g)} - a_N} = \int \frac{A.K}{V_m} \quad (15)$$

از طرف دیگر اگر شرایط در سطح مذاب را تعادلی فرض کنیم، طبق قانون سیورت خواهیم داشت:

$$a_N^{(g)} = k_{eq} \cdot \sqrt{P_{N_2}} \quad (16)$$

بر اساس روابط (۸)، (۹) و (۱۰) ضریب اکتیویته نیتروژن محلول در مذاب برحسب ضرائب تاثیر محاسبه می شود.

$$\log f_N = -0.0870(\%Cr) + 0.0006(\%Cr)^2 \quad \text{یعنی براساس رابطه (۱۱)، در دمای ۱۷۷۳ درجه کلوین داریم:}$$

$$f_N = 0.912$$

بنابراین به ازای ۴۶ درصد کروم، f_N برابر خواهد

بود با:

حال با فرض $P_{N_2} = 1$ و با توجه به اینکه غلظت نیتروژن اولیه در این آلیاژ $N_0 ppm$ باشد براساس روابط (۱۱)، (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) و با فرض اینکه ضرائب تاثیر در دمای ۱۵۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد تفاوتی نمی کند، در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد خواهیم داشت:

$$\int_{a_{N_0}}^{a_N} \frac{d(a_N)}{a_N^{(g)} - a_N} = \int_{0.912N_0}^{0.912N_t} \frac{0.912d(\%WtN)}{1.299\sqrt{1} - 0.912(\%WtN)}$$

$$= -\ln[(1.299 - 0.912(\%WtN_t))] + \ln[(1.299 - 0.912(\%WtN_0))]$$

و بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{A.K}{V_m} \cdot t = -\ln(1.299 - 0.912(\%WtN_t)) + 0.218 \quad (17)$$

به همین ترتیب در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد نیز معادلات حاکم به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{A.K}{V_m} \cdot t = -\ln(1.115 - 0.912(\%WtN_t)) + 0.058 \quad (18)$$

از روابط (۱۷) و (۱۸) می توان ضریب انتقال جرم را در دمای ۱۴۵۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد محاسبه کرد. اگر نمودار ضریب انتقال جرم برحسب زمان تابعی ثابت شود، میتوان گفت که این معادلات از تئوری لایه مرزی تبعیت می کند.

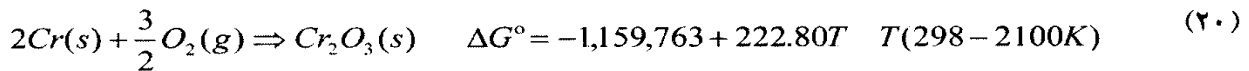
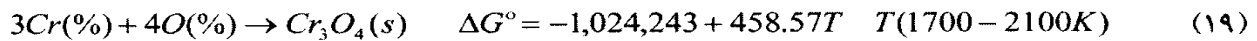
روش تحقیق

در آزمایشها از بوته با پایه آلومینا با خلوص بالا و با پوشش کرومیت استفاده شد. پوشش کرومیت داده شده روی بوته آلومینا به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد پخت گردید. در این مرحله، در نهایت بوته تا حداکثر ۲/۵ دقیقه در دمای ثابت ۱۵۵۰ درجه سانتیگراد، توان تحمل نگهداری ذوب را داشت. (وزن کل نمونه ۲۰ گرم می باشد). کروم مصرفی از شرکت GFPE آلمان و نیکل اولیه نیز

محصول شرکت INCO کانادا می باشد. جدول (۲) بیانگر مشخصات مواد اولیه مورد مصرف می باشد. لازم به تذکر است که گاز نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹ بوده و درصد اکسیژن آن در محدوده ۵-7ppm گزارش شده است. جهت اندازه گیری دما پیرومتر را با استفاده از ترموکوپل در کوره ذوب القایی با ظرفیت صد کیلوگرم کالیبره شد. در نهایت پس از گرفتن ۴۴ ذوب دو نمودار در دماهای ۱۴۵۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد به نتیجه رسیده و برای هر نمودار ۴ نقطه بدست آمد. از این چهار نقطه، سه عدد مورد قبول واقع شده و قابل توجیه بود. نمونه هایی که کمتر از 100ppm نیتروژن دارند، وزن نمونه هارا می توان حدود ۰/۷ گرم در نظر گرفت. ولی در مورد نمونه های این تحقیق، با توجه به درصد نیتروژن بالای آن، برای اندازه گیری دقیق نیتروژن، وزن نمونه ها ۰/۰۲ ± ۰/۱ گرم در نظر گرفته شد. از هر پولکی حدود ۵ عدد نمونه (تعیین متوسط نیتروژن برای هر نمونه) ۰/۱ گرمی تهیه و سپس با سمباده هایی که جهت پولیش متالوگرافی استفاده می شوند، پس از زدودن هرگونه اکسید و آلودگی نمونه ها به وزن مربوطه رسانده شدند. تست های نیتروژن در شرکت فولاد مبارکه و با استفاده از دستگاههای LECO اندازه گیری شد. پس از اندازه گیری نیتروژن نمونه ها، منحنی های درصد نیتروژن بر حسب زمان رسم و به بحث و نتیجه گیری راجع به رسیدن و یا نرسیدن به شرایط تعادل و از طرف دیگر انطباق آن با مدل لایه مرزی و بدست آوردن ضریب انتقال جرم می پردازیم.

نتایج و بحث

آزمایشات مبین این مطلب است که تشکیل و ایجاد یک لایه اکسید کروم بر روی سطح مذاب مانع از جذب نیتروژن در این آلیاژ از مقدار خاصی به بالاتر می شود. جدول (۳) مقادیر نیتروژن اندازه گیری شده بر حسب زمان را در دودمای ۱۴۵۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد بیان می دارد و بنابراین براساس نمودار هایی که در شکل (۵) بدست آمده است، در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد با توجه به اینکه شدت اکسیداسیون بسیار بیشتر از ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد است، در نتیجه میزان نیتروژن حل شده در آلیاژ در 100ppm ثابت خواهد ماند و این در حالیست که در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد منحنی با یک شیب صعودی بالای منحنی ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد قرار می گیرد. از مقایسه این دو نمودار متوجه می شویم که در حالتی که دمش نیتروژن از سطح باشد، با توجه به اینکه نیتروژن ما ناخالص و حاوی مقادیری اکسیژن (5-7ppm) است، لذا اکسید کروم تشکیل شده مانع از جذب بیشتر نیتروژن می شود و این در حالیست که از لحاظ ترمودینامیک موضوع با توجه به بحثهایی که مباحث قبل به آن اشاره شد، با افزایش دما درصد نیتروژن حل شده در مذاب افزایش می یابد. بنابراین این می توان تشکیل اکسید کروم را مانعی سینتیکی برای جذب نیتروژن دانست و چون تشکیل اکسید کروم در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد سریعتر از ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد است بنابراین نمودار ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد زیر نمودار ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد قرار می گیرد. البته نتیجه SEM وجود مقداری سیلیس را تصدیق می کند که درصد آن نسبت به اکسید کروم بسیار کم بود برای توجیه نمودارها اگر بخواهیم به ترمودینامیک تشکیل اکسید کروم نگاه کنیم، روابط ترمودینامیکی زیر را خواهیم داشت: [۸]



چنانچه انرژی استاندارد هر کدام از این واکنشها را در دودمای ۱۷۷۳ و ۱۷۲۳ درجه کلوین حساب کنیم، این انرژی آزاد محاسبه شده در مورد هر دو واکنش منفی خواهد بود و از آنجاییکه مقدار آن هم زیاد می باشد بنابراین تشکیل اکسید کروم در آن دما امری بسیار بدیهی به نظر می رسد. ولی با توجه به اینکه هر دو واکنش، واکنشهایی گرمازا می باشند، باید این تصور را داشت که با افزایش دما درصد اکسید کروم تشکیل شده باید کاهش یابد و این در حالیست که نمودار غلظت نیتروژن بر حسب زمان در منحنی ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد مافوق منحنی ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد قرار دارد. این وضعیت را باید به سرعت تشکیل اکسید کروم و تاثیر دما بر ثابت سینتیکی سرعت واکنش که تابعی اکسپانسیلی است نسبت داد.

$$V = k.[Cr]^a [O]^b \quad (21)$$

که در این رابطه ها V سرعت واکنش تشکیل اکسید و E انرژی اکتیواسیون و k_0 ثابت سینتیکی واکنش می باشد. [۷]

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (22)$$

در اینجا مشاهده می شود که با افزایش دما k به شدت افزایش یافته و بنابراین V افزایش می یابد.

نتیجه گیری

ضرائب انتقال جرم محاسبه شده در جداول (۴) و (۵) به ترتیب، در دودمای ۱۴۵۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد محاسبه شده است. در نهایت در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد با توجه به اینکه اکسید کروم کمتری تشکیل شده و مقادیر واقعی تر به نظر می رسد و با توجه به اینکه ضرائب انتقال جرم محاسبه شده به هم نزدیک هستند، با در نظر گرفتن مقدار متوسط، ضریب انتقال جرم نیتروژن در مذاب آلیاژ Ni-46%Cr برابر خواهد بود با:

$$K_M^{1723K} = 1.568 \times 10^{-3} \pm 0.325 \times 10^{-3}$$

از طرفی مشاهده می شود که با افزایش زمان و اضافه شدن اکسید کروم بر روی سطح مذاب، میزان ضریب انتقال جرم محاسبه شده کاهش می یابد.

نکته ای که در این مقاله کاربرد عملی دارد این است که اکسید کروم تشکیل شده بر روی مذاب مانع از رسیدن نیتروژن آلیاژ به حد اشباع که مقدار آن حدود 4000ppm است، می شود.

منابع و مراجع

1. Ennis.P.J, Bridges.P.J, "The Development of Cast Ni-50%Cr Alloy Combining Resistance to Service Embrittlement and High Creep Strength" journal of the institute of Metals", 1972, vol 100
2. H. Wada, D. Pehlke, " Nitrogen Solubility In Liquid Fe-Ta, Fe-Cr-Ta and Fe-Ni-Ta and Fe-Cr-Ni-Ta Alloys" ,Metallurgical Transaction B, 1979, vol 11B, PP 51-56
3. H. Wada, D. Pehlke, " Nitrogen Solution and Titanium Nitride Precipitation in Liquid Fe-Cr-Ni Alloys", Metallurgical Transaction B, 1977, vol 8B, PP 443-450
4. H. Wada, D. Pehlke, "Solubility of Nitrogen in Liquid Fe-Cr-Ni Alloys Containing Manganese and Molybdenum" Metallurgical Transaction B, 1977, vol 8B, PP 675-682
5. H. Wada, D. Pehlke, " Nitrogen Solubility and Aluminium Nitride Precipitation in Liquid Iron, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni and Fe-Cr-Ni -Mo Alloys Containing Manganese and Molybdenum" Metallurgical Transaction B, 1978, vol 8B, PP 441-448
6. M. Herrera, D. Ablitzer, "Dissolution of Nitrogen in Liquid Ni-Cr Superalloys", Canadian Metallurgical Quarterly" 1997, vol 36, no 5, pp 341-345
۷. سید خطیب الاسلام صدر نژاد، فرایندهای سینتیک در مهندسی متالورژی، ۱۳۷۲، تهران، انتشارات وزارت امور خارجه
۸. سید خطیب الاسلام صدر نژاد، حرارت و حرکت در مواد، ۱۳۷۸، چاپخانه سپهر تهران، انتشارات امیرکبیر

جدول ۱. تاثیر کروم بر حلالیت نیتروژن در مذاب نیکل - کروم در دودمای ۱۷۷۳ و ۱۸۷۳ درجه کلون در فشار $10^5 \times 1.013$ پاسکال نیتروژن [۲]

1773 K		1873 K	
Wt%Cr	Wt%N	Wt%Cr	Wt%N
3.1	0.0037	6.9	0.0054
9.0	0.0088	8.3	0.0077
11.3	0.014	13	0.0191
13.5	0.0207	16.2	0.0303
15.8	0.0408	17.4	0.0361
25.1	0.1128	18.6	0.0353
26.7	0.1397	18.8	0.0408
29.3	0.2102	24.3	0.0938
		30.6	0.1534
		33.2	0.2521
		35.7	0.387

جدول ۲. مشخصات مواد اولیه مصرفی

ماده اولیه	درجه خلوص	درصد نیتروژن (ppm)
کروم	٪۹۹/۰۲	۱۱۰۰
نیکل	٪۹۹/۹۹	۱۰۰

جدول ۳. میزان نیتروژن متوسط اندازه گیری شده بر حسب ppm در دودمای ۱۴۵۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد در زمانهای مختلف نگهداری نیتروژن تحت فشار نیتروژن یک اتمسفر

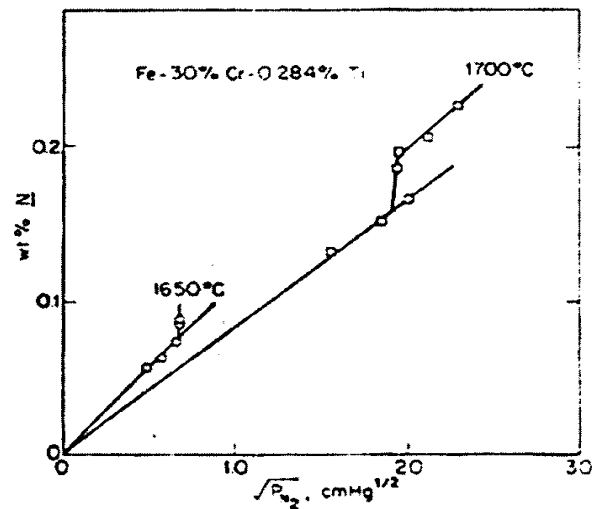
شماره نمونه	دمای ذوب (درجه سانتیگراد)	زمان نگهداری (ثانیه)	غلظت نیتروژن (ppm)
۱	۱۵۰۰	۱۵	۹۴۴
۲	۱۵۰۰	۳۰	۱۱۰۰
۳	۱۵۰۰	۹۰	۱۱۰۰
۴	۱۴۵۰	۳۰	۱۴۶۰
۵	۱۴۵۰	۴۵	۱۵۷۰
۶	۱۴۵۰	۶۰	۱۷۵۰

جدول ۴. ضرائب انتقال جرم محاسبه شده برای نیتروژن در مذاب آلیاژ Ni-46%Cr بر اساس تئوری لایه مرزی در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد تحت اتمسفر نیتروژن با فشار ۱۰/۹۹۹ اتمسفر

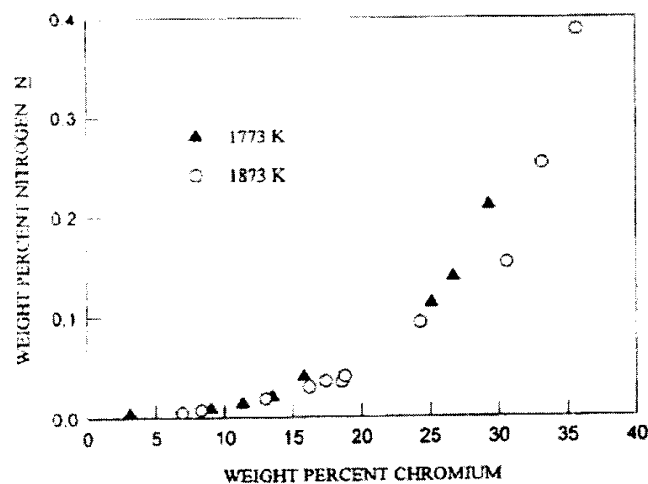
زمان نگهداری (ثانیه)	غلظت نیتروژن (ppm)	ضریب انتقال جرم (سانتیمتر بر ثانیه)
0	600
15	1072	1.923×10^{-3}
30	1460	1.79×10^{-3}
45	1570	1.35×10^{-3}
60	1750	1.21×10^{-3}

جدول ۵. ضرائب انتقال جرم محاسبه شده برای نیتروژن در مذاب آلیاژ Ni-46%Cr بر اساس تئوری لایه مرزی در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد تحت اتمسفر نیتروژن با فشار ۰/۹۹۹ اتمسفر

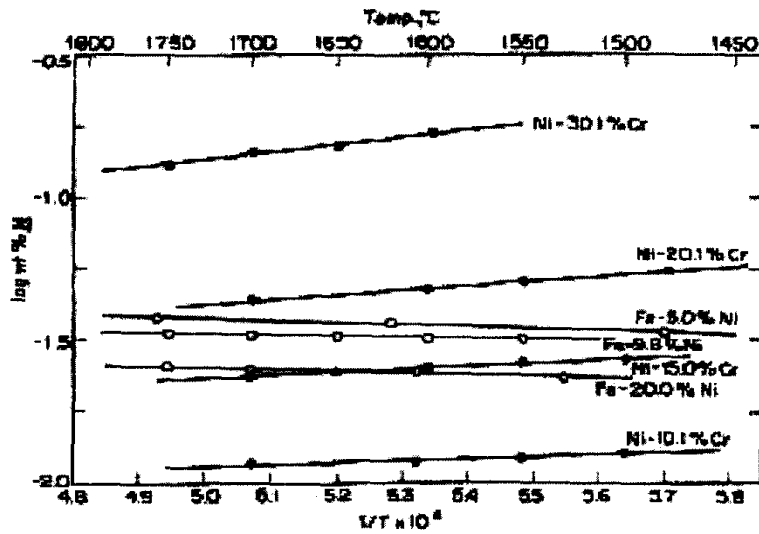
زمان نگهداری (ثانیه)	غلظت نیتروژن (ppm)	ضریب انتقال جرم (سانتیمتر بر ثانیه)
0	600
15	944	1.64×10^{-3}
20	990	1.34×10^{-3}
30	1100	1.21×10^{-3}



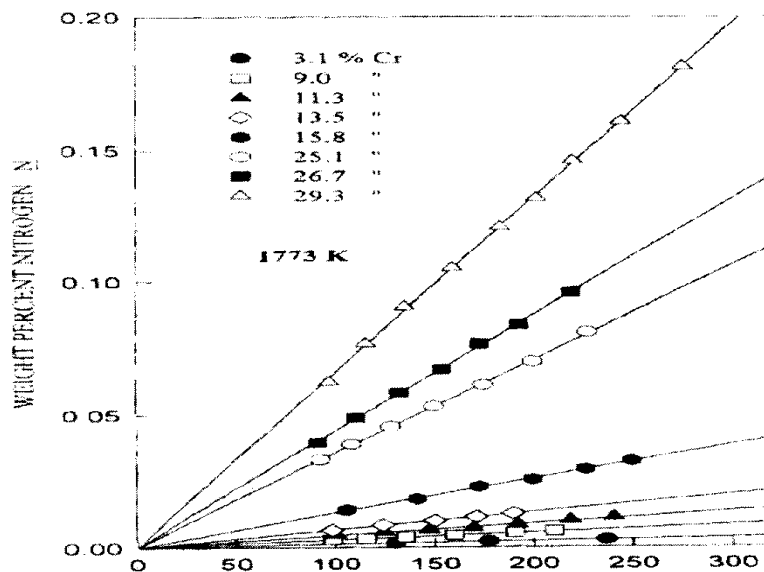
شکل (۱): نمودار درصد وزنی نیتروژن بر حسب جذر فشار نیتروژن جهت آلیاژ [۲]Fe-Cr-Ni-Ti



شکل ۳. نمودار درصد وزنی نیتروژن بر حسب درصد کروم در دو دمای ۱۷۷۳ و ۱۸۷۳ درجه کلون در فشار ۱ اتمسفر نیتروژن [۵]

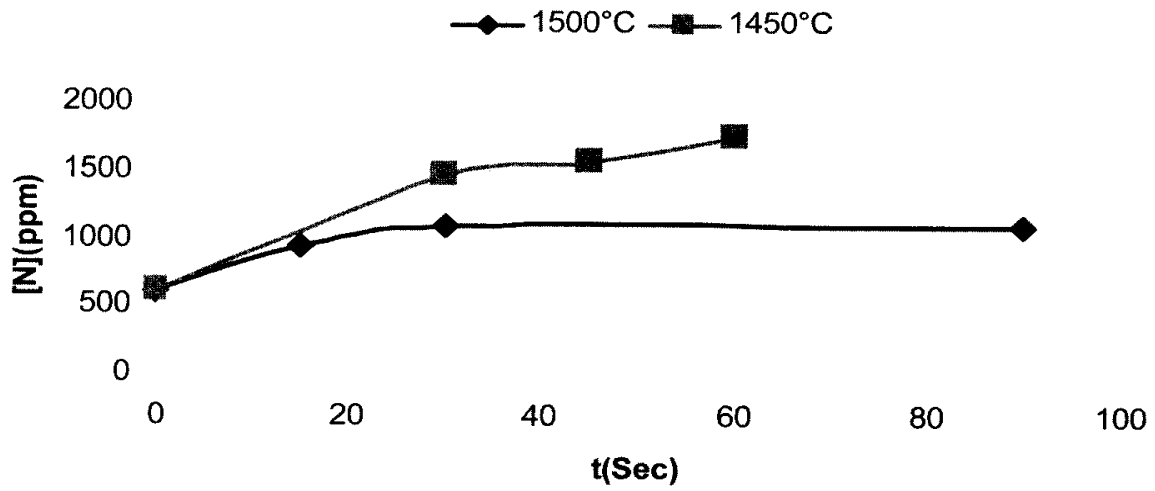


شکل ۴. نمودار درصد وزنی نیتروژن بر حسب دما در آلیاژهای آهن-نیکل و نیکل-کروم [۲]



شکل ۲. نمودار حلالیت نیتروژن بر حسب مجذور فشار نیتروژن در مذاب نیکل-کروم در دمای ۱۷۷۳ درجه کلون در غلظت های کروم مختلف [۵]

The Comparison of Cures of Molten Ni-46%Cr Alloys at Two Temperatures



شکل ۵. مقایسه نمودارهای تغییرات نیتروژن محلول در آلیاژ Ni-46%Cr بر حسب زمان در دودمای ۱۴۵۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد