درجه حرارت کرایوجنیک و موارد استعمال آن

از : محمد رضا اسلامی

ادامه ازشماره قبل

۹ـ۱ نیمه هادیها دردرجات حرارتی پائین

تفاوت اساسی بین نیمه هادیها وعایق‌ها ازاین جاست که فاصله مدار انتهائی(forbid len gap) درنیمه هادیها کوچکترازعایق‌ها است. البته درموقع پخت کریستالیزه کردن نیمه‌هادیها عملا ناخالصی‌هائی impurities در آن ها قرار میدهند و عمل این ناخالصی‌ها اینست که مدار هـای فرعی دیگری بین دومدار آخر اتمها بوجود آورده واین‌مدارهای‌فرعی باعث میشوند کـه الکترونها راحت تر به مدار آخر برسند. پخت نیمه هادیها وبوجود آوردن‌این‌ناخالصی ها باید خیلی دقیق انجام شود .

فنومن‌های مهم نیمه هادیها بشرح زیرمیباشند:

۱ـ فنومن رزنانس.

۲ـ خواص الکتریکی .

۳ـ خواص حرارتی .

٤ـ خواص نوری .

۱ـ۹ـ۱ فنومن رزنانس

ـ رزنانس‌سیکلوترن(Cyclotron Resonance) اندازه گیری رزنانس‌دیامغناطیس‌یاسیکلوترن درنیمه کنداکتورها تجزیه‌ای است کـه مستقیماً تأثیرجرم «بارحمال» (Charge Carrier)رااندازه میگیرد.

البته مفهوم رزنانس سیکلوترن وقتی کـه در جامدات بوجود میآید نسبتاً جـدید است. بطریق تجـربی مشاهده شده است کـه در فلز ژرمنیم Germanium ودرمحیط کرایوجانیکی‌این‌خاصیت را میتوان ایجاد کرد .

ـ رزنانس پارا مغناطیس وضعیت های ناخالص

در رزنانس پارامغناطیس یا(electron spin) بایك مشاهده سریع نتیجه میشود که حالت‌ناپایداری (transition) یـك میدان مغناطیس میکروموج (microwave) متناسب است بـا مربع ممانهـای مغناطیسی (۲) . در میدان مغناطیسی ثـابت اسپین‌ها (spins) میتوانند درجهت موازی‌یاغیرموازی‌میدان قراربگیرند. رابطه‌رزنانس‌دراین‌حالت برابراست‌با:

$$h\gamma_{.} = g\mu_b H \qquad (0)$$

که $\gamma_{.}$ فرکانس g ضریب نیروی شکافتن اتم μ_b (Bahr magneton) وH میدان‌مغناطیسی‌میباشد.

۲ـ۹ـ۱ خواص الکتریکی

در درجات حرارتی پائین مقدارهدایت‌الکتریکی بوسیلهٔ بار های حمال (Charge Carrier) یـك طرفه خواهد شد که یا بانوع N خواهد بودو یا با نوع P (کـه در درجه حرارت پائین یکی‌از دونوع N و P ازبین‌رفته وجهت الکترون مشخص میشود) . دانسیته جریان N از رابطه زیر بدست میآید .

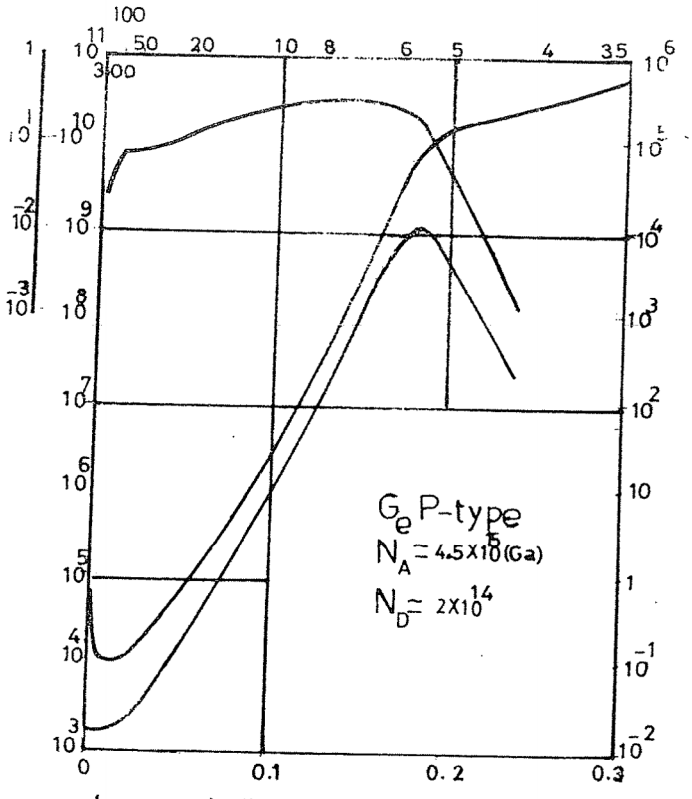
$$N = \pm \frac{\gamma}{Re}$$

که R ضریب هال(Hall) , e مقدار بارالکترون و γ یک ضریب است ومعمولا بین ۱ یا ۲ میباشد که بستگی به آمار (statistic) گاز الکترون (ابر الکترونی)وزمان (carrier relaxation time) دارد .

درنمونه ژرمنیوم خنثی وقتی درجه حرارت به حدود درجه حرارت مایع هلیوم میل‌بکند ویا وارد این‌محدوده‌بشود.ضریب هال(Hall) ازیك‌ماکزیمم عبور کرده و سپس بنسبت نقصان درجه حرارت کم میشود. در نتیجه این ضریب زاویه مقاومت ، خیلی سریع تغییر کرده به یك مقدارخیلی کوچکترمیرسد وبعد باکم کردن درجه حرارت مقاومت ادامه پیدا کرده زیاد میشود ولی بایك نسبت ثابت کوچکتر.

هدایت ژرمنیوم در رنج درجه حرارت های پائین ممکنست بوسیله معادله تجربی زیر نشان داده شود (شکل۵)

$$\sigma = C_1 e^{-\frac{E_1}{KT}} + C_2 e^{-\frac{E_2}{KT}} + C_3 e^{-\frac{E_3}{KT}}$$



شکل ۵ ـ سختی تغییرات ضریب هال بادرجه حرارت

بدین ترتیب که ۱ به قسمت درجه حرارت‌بالا مربوط بوده ۲ مربوط به قسمت متوسط و ۳ مربوط به قسمت درجه حرارت کم میباشد .

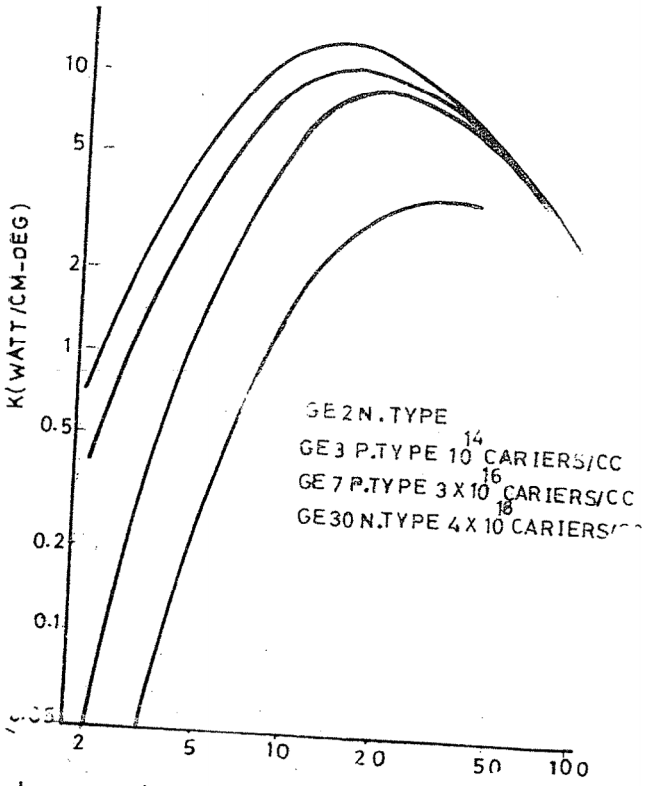
۳ـ۹ـ۱ خواص حرارتی (9)

درنیمه هادیها حرارت بیشتر بوسیله شبکه الکترون هدایت میشود تا هدایت الکترون .

توضیح آنکه وقتی یك نمونه نیمه هادی‌سرد میشود. هدایت حرارتی آن با کم شدن درجه‌حرارت اضافه میشود تا به‌مقدارماکزیممی‌دریك درجه‌حرارت ازمرتبه $\frac{1}{13}$ درجه حرارت Debey برسد ودرصورتی که بازهم‌درجه حرارت پائین‌تر برود. هدایت‌حرارتی بسرعت نزول کرده وبسمت صفر در درجه حرارت 0^{oK} (صفرمطلق) میل‌میکند . (شکل۶)

تجربه‌ای که بوسیله Keeson و Pearlman انجام‌شد(۲)نشان‌میدهد که حرارت ویژه C_v مجموع ازیك حرارت مخصوص شبکه‌ای متناسب با T^3 ویك حرارت مخصوص الکترونیك متناسب با T میباشد.

$$C_v = \alpha T^3 + \gamma T$$



شکل۶ ـ ضریب هدایت حرارتی‌نوع m و p برای درجه حرارت های‌پائین

که α و γ ضرایب ثابتی میباشند .

۴ـ۹ـ۱ خواص نوری (۲)

ازدرجه‌حرارتهای‌پائین‌برای‌مطالعه‌خواص‌نوری‌برای تجزیه وتعیین‌سطوح انرژی وبرای‌ازدیادحساسیت در مطالعه فتو کندا کتیویته (photoconductivity) استفاده میشود الکترونها کـه بطور نوری بـرای هـدایت تحریـك شده انـد . یك فتو کـورنت (photocurrent)خواهندداد که‌بامقایسه‌باجریان تاریك(dark current)زیادمیباشد. برای‌مثال‌مشاهده شده است کـه ترکیب (indium antimonide) دارای حساسیت فتو کندا کتیوی در 5^{oK} میباشد کـه تقریباً 8 مرتبه بزرگتر ازحساسیت در 85^{oK} است.

خواص مصالح ساختمانی دردرجات حرارت پائین

موارد بسیار زیاد مصرف مایعات کرایوجانیك درموشك وپرتاب دیگراجسام بفضا اطلاعات‌بیشتری را در خواص و طـرح اولیه مصالح در رنج درجـات حرارتی خیلی پائین‌لازم نموده و کوشش‌های زیادی ازچند سال پیش به اینطرف برای این‌کارمبذول‌شده است .

بطور کلی کم کردن درجه حرارت دریك‌جسم صلب مقاومت جاری شدن ، مقاومـت کشش ، سختی و مقاومت خستگی (fatigue) را اضافـه میکند . مقداری‌ازمصالح‌تحولات‌جامد ـ جامدرا که‌ممکنست رورسیبل بوده و یا اینکه نباشند ، تحمل کـرده ولی این‌تغییرات ممکنست حتی درتغییرخواص مکانیکی هم مؤثرباشد .

۱ـ۲ فلزات

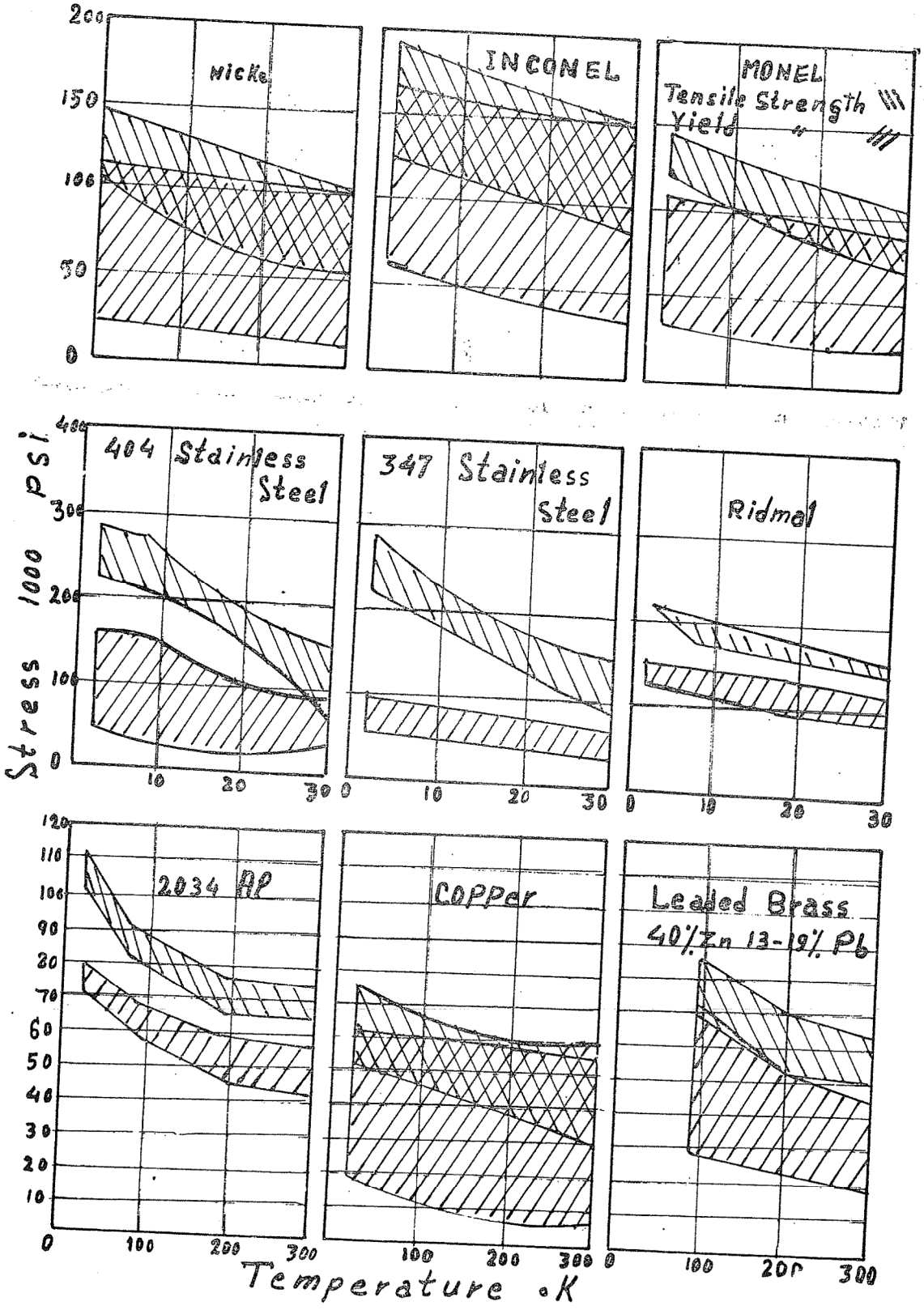
درخواص مکانیکی فلزات در درجه حرارت کاملا پائین. یکی‌ازپدیده های مهم، مسئله شکنندگی فولاد کربن‌دار معمولی‌میباشد . وبهمین علت تابحال خرابی‌های بزرگی درساختمانهای موشکی‌پیش آمده است. فولاد کربن‌دار ازمصالحی‌است که موردمصرف زیاد داشته و دربیشتراین‌ساختمانها بکار برده میشود و بدبختانه این فلز در درجات حرارتی خیلی پـائین شکننده است.

البته این‌پدیده یك مشخصه کلی‌برای‌همه‌فلزات وآلیاژ های معمولی نمی‌باشد . بیشتر فلزات معمولی مثل آلومینیوم ، مس ، نیکل و بیشتر آلیاژ هایشان مثل آلیاژ «سری 300» فولاد های ضد زنك اوستینت تابع این فنومن شکنندگی در درجات حرارتی‌پائین نیستند .

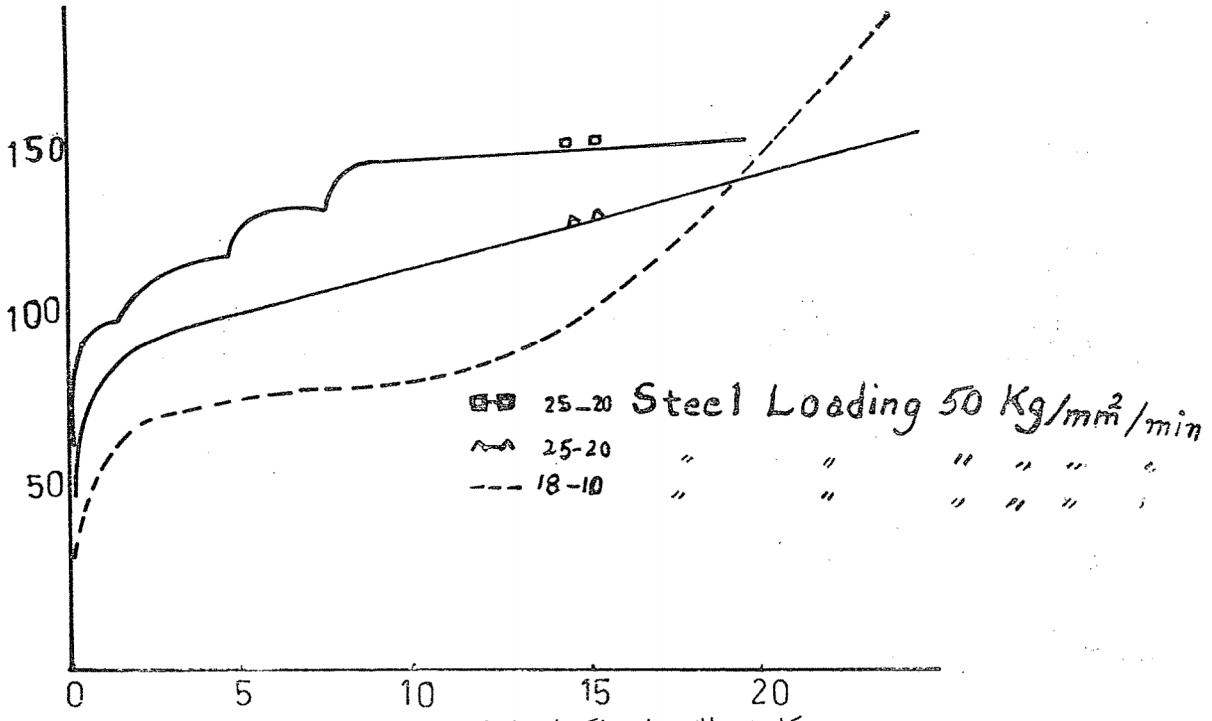
یك‌رابطه مناسبی‌میتوان‌بین‌نوع‌شبکه کریستال وشکنندگی جسم در درجات حرارتی کرایوجانیك برقرارنمود. وبدین‌ترتیب آندسته ازفلزات که شبکه کریستالی آنها ازنوع مکعب باوجوه متمرکزمیباشد در درجات حرارتی پائین‌شکننده نمیشوند، درصورتی که نوع کریستال آنها مکعب متمرکزباشد شکننده خواهد شد.(۲) منحنی‌های شکل۷ و ۸ بستگی‌درجه حرارت را با مقاومت جاری شدن و مقاومت انتهائی کشش برای بعضی ازفلزات معمولی که برای وسائل مورد مصرفی در درجات حرارتی پائین‌ساخته شده‌اند نشان میدهد . چون فولادهای ضد زنك درساختمانی که درمحیط کرایوجانیك‌واقع میشوند بیشترمصرف میشود . لذا یکی از ضعف های آن که شناخته شده لغزش یـا Creep میباشد. این‌اثر باندازه‌کافی مهم بوده و اغلب بـاعث شکنندگی وسایـل کرایوجانیك میگردد .

منحنی‌لغزش‌فولادهای ضدزنك 20^{OK} آزمایش شده ودرشکل۹ رسم گردیده‌است. (9)

درشکل۱۰ میتوان دیفراکسیون الکترون را روی یك نمونه نازك از فولادی کـه تحت تأثیر تنش زیـاد میباشد (77^{OK} $\tau = 123^{kgr/mm^2}$) مشاهـده نمود . دراین‌شکل‌جابجاشدگی بلورها دراثر لغزش



شکلهای ۷و۸ قدرت کشش وحد جاری برای چند فلز و آلیاژ متداول



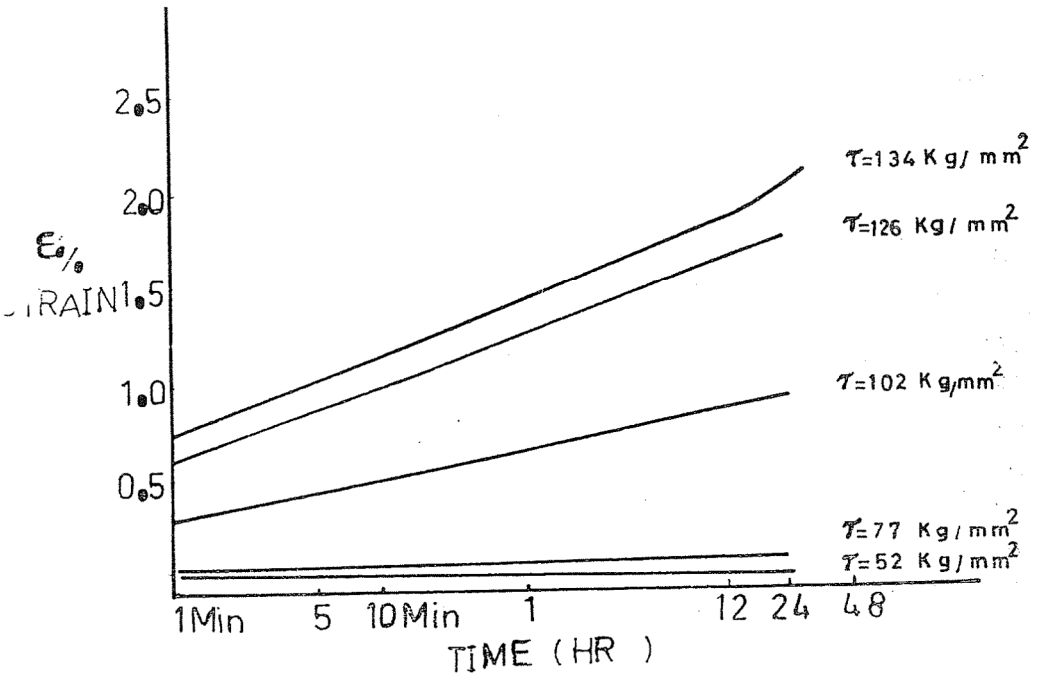
شکل ۹ ـ الف ـ اثر باگیزاری(۲۰ـko)

نشان داده شده است .

۲ـ۲ پلاستیک‌ها

با وجود اطلاعات کمی کـه در مورد خـواص مکانیکی پلاستک‌ها در درجه حرارت پائین موجود است ولـی پلاستیک فیبر شیشه‌ای پیش فشرده دارای مزایای‌جالبی میباشد که یکی نسبت زیاد مقاومت به وزن بوده ودیگرخواص آن آسانی‌ساخته شدن، دوام، سادگی عمل بـرای ساختن شکلهای پیچیده و فساد تدریجی مقاومت میباشد.

بیشترپلاستیک‌ها دردرجات حرارتی‌پائین کاملا



شکل ۹ ـ ب ـ خزش در۲۰ok

قوی بوده وممکنست در صورتی که از شوك حرارتی دوری شود از آن‌ها استفاده کرد. پلاستیك دردرجات حرارتی پائین درمقابل‌ضربه مکانیکی بیشتراز شیشه پایداری میکند . (جدول ۱) خواص پلاستیك ها را در درجات حرارتی پائین نشان میدهد (۹)

۳ـ۲ حرارت مخصوص مصالح دردرجه حرارت پائین

حرارت مخصوص جامدات با کریستال ساده بخوبی بوسیله رابطه Dehey نشان داده میشود(2)

$$C_v = 9R\left(\frac{T}{\theta}\right)^3 \int_0^{\theta/T} \frac{X^4 e^X}{(e^x-1)^2} dx = 3R\,D\left(\frac{\theta}{T}\right)$$

که C_v حرارت مخصوص و R ثابت عمومی گازها و θ درجه حرارت Dehey میباشد

۴ـ۲ هادی های فلزی

مقاومت الکتریکی بیشترالمانهای‌فلزی‌خالص دردرجه‌حرارت معمولی‌تقریباًمتناسب بادرجه‌حرارت مطلق میباشد. مکانیزم میکروسکپی‌جریان‌الکترون بستگی به تحریك حرارتی دارد . بهرحال در درجه حرارت خیلی‌پائین ، مقاومت به یك مقدار باقیمانده میل‌میکند که‌اغلب بستگی‌به درجه حرارت‌دارد(۹). این‌مقاومت باقیمانده به نقص یاناخالصی جسم نسبت داده‌میشود. یك‌ناخالصی کم‌این‌اثررا دارد که‌افزایش بستگی‌حرارت را به مقاومت اضافه میکند .

آلیاژها ، طبق یك قاعده‌ای مقاومتی خیلی بیشترازالمانت های‌تشکیل‌دهنده‌خود داشته وضرائب مقاومت ـ درجه حرارت آنها کاملا کم هستند.

۵ـ۲ هدایت مصالح فلزی کرایوجنیك (10)

همانطور که اهمیت دارد بدانیم چه مقدار هدایت حرارتی در هر درجه حرارت برای مصالح وجود دارد همانقدر هم مهم است بتوان یك فلزرا در درجه حرارت کم یازیاد انتخاب نمود (البته نسبت به ناخالص‌هایش) .

بنابراین میخواهیم هدایت حرارتی „k“ را از روی مقاومت الکتریکی باقیمانده و مربوط به ناخالصی P_o حساب بکنیم . مقاومت ایده‌آل مربوط به امواج‌حرارتی دردرجه حرارت اطاق را $P_i(T'_1)$ فرض نموده ورابطه زیر را با قانون Matthiesse n

$$P_i(T_1) = P(T_1) - P_0 \qquad (11)$$

درنظربگیرید یك المان فلزی خالصی‌را که درآن هدایت حرارتی شبکه‌ای «K_g» خیلی‌بیشتراز مؤلفه هدایت‌حرارتی‌الکترون‌باشد. بنابراین‌خواهیم داشت .

(مربوط به امواج حرارتی) $+W_t$ (مربوط به ناخالصی ها) $W = W_o = \frac{1}{K}$ که در آن

$$W_o = \frac{P_o}{PL} \text{ و } L = 2.45 \times 10^{-6} \frac{\text{watt-ohm}}{\text{deg}^2}$$

میباشد T درجه حرارتی است متناسب با W_o در درجه حرارت کرایوجانیك

$$K \simeq K_o = LT/_{Po} \qquad W_i \ll W_o$$

هدایت در درجه حرارت متوسط

ازناحیه درجه حرارت متوسط یك‌فرمول‌نیمه تجربی بوسیله (وایت) و (وودز) (۱۰) پیشنهاد شده

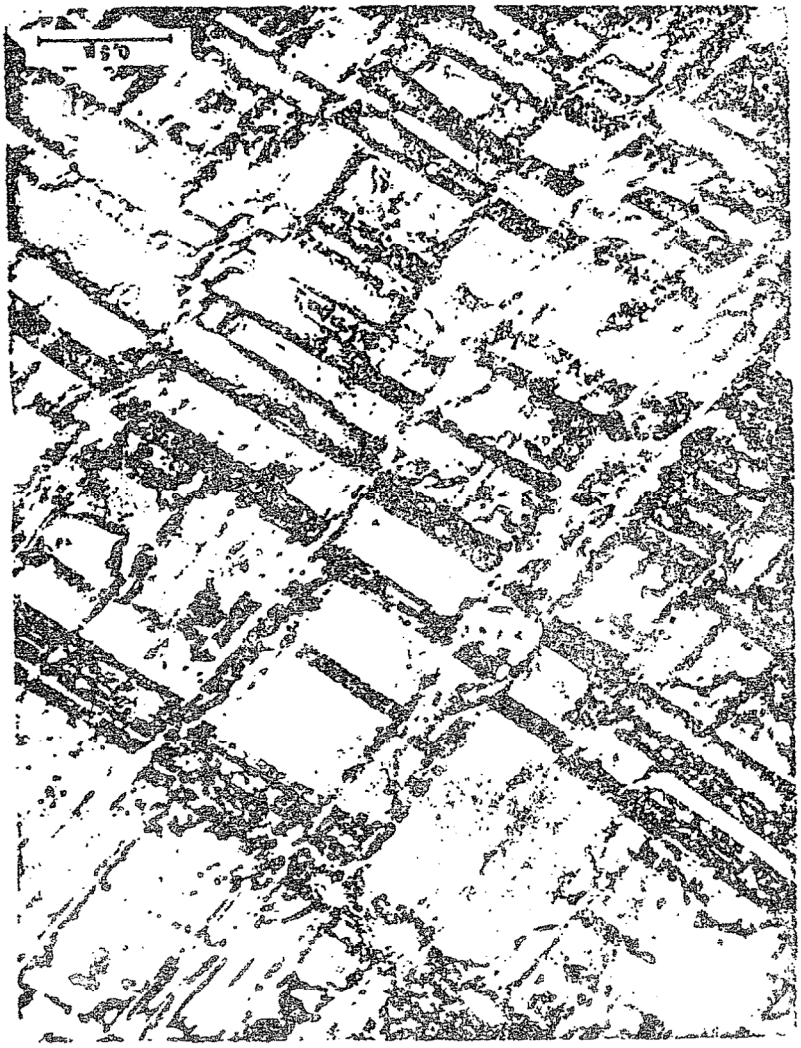
$$\frac{Wi}{W_\infty} = 2\left(\frac{T}{\theta}\right)^2 J_3\left(\frac{\theta}{T}\right) \qquad (10)$$

$$J_3\left(\frac{\theta}{T}\right) = \int_0^{\frac{\theta}{T}} \frac{X^3\ dX}{(e^X-1)(1-e^{-X})}$$

که W_∞ بستگی‌به‌درجه‌حرارت ندارد. و θ مشخصه حرارتی (Dehey) بوده. برای $T \ll \frac{\theta}{10}$ این‌فرمول بصورت زیر درمیاید

$$\frac{Wi}{W_\infty} = c\left(\frac{T}{\theta}\right)^2$$

که $C = 14.4$ و با اطلاعاتی که در دست است بخوبی تطبیق میکند و بطریق تجربی تعیین میشود شکل۱۱ نتایج بدست‌آمده(10) برای (rhenium) (که تاحدی جسم کرایوجانیك گران قیمت است .)



شکل ۱۰ ــ تصویری از فولادی که تحت تغییر طول نسبی زیادی قرار دارد بوسیله میکرسکب الکترونی

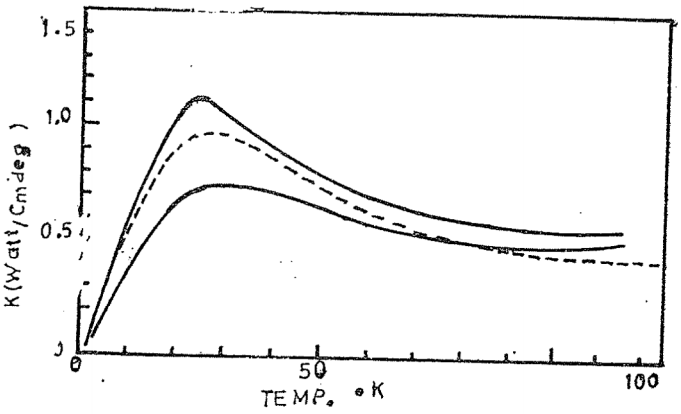
نشان میدهد ، در مورد المانهای مسائل ناخالص و آلیاژها کمتر اطلاعات دقیق موجود میباشد و دلیل آنهم اینست که قوانینی که برای محاسبه ضریب هدایت حرارت شبکه‌ای گفته شد درمورد این اجسام مشکوك میباشد .

طبق یك قاعده کلی اگر $\frac{P_o}{P(\pi)} < 0.5$ باشد K_g بامقایسه با K_e کوچك خواهد بود. مثلا کمتر از K_e 20% درهمه درجات حرارت و خواص طرح کرایوجانیك

بهرحال درمورد یك چنین مصالح مهمی مثل Inconel , annealed monel فولاد زنك نزن وغیره K_g ممکنست قابل مقایسه وحتی بیشتر از K_e بودر حدود یك رنج وسیع حرارتی باشد .

از اینرو برای بدست آوردن $K = K_e + K_g$ تخمین K_g لازمست. در آلیاژهای آنیکه شده دردرجه حرارت $T \leqslant \theta/20$ الکترونها منبع اصلی پراکنده کردن امواج شبکه‌ای هستند و اگر فرمول Klemens - Makinson رابکار ببریم خواهیم داشت :

$$K_g = 3.3\, K_i\, (T) \left(\frac{T}{\theta}\right)^4 N^{-\frac{4}{3}}$$



Re 1

Re 2

برای Re از رابطه

$$\rho \times 30 \times 10^{6}$$

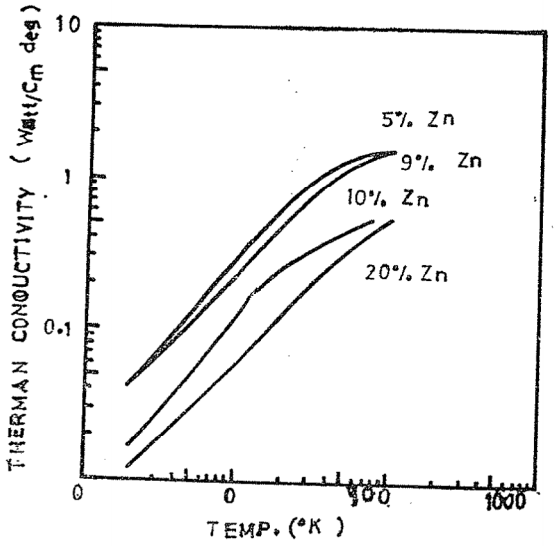
$$2300 \frac{\rho.}{\rho.0.95} \times 230 \times 10^{-6}$$

ضریب هدایتی (K) دینوم

کـه N تعداد الکترونهای آزاد در یك اتم‌میباشد .

در شکل ۱۲ بعضی اطلاعات بـرای برنج و **Inconel** داده شده خواص و رفتاری که مصالح‌در درجات حرارت کم ازخودنشان‌میدهند باعث شده که روزبروز رشته های متعددی در محیط کرایوجانیك بازشود. باتحقیقات‌زیادی که دراین‌مورد شده‌تا کنون به‌خواص‌عجیبی‌دراین‌محیط پی‌برده‌شده. بعنوان‌مثال یك مورد استفادهٔ آن در پزشکی ، زنـده نگهداشتن موجودات زنده در این محیط است توضیح آنـکه چنانچه یك‌موجود زنده را در عرض زمـان کوتاهی (مثلا بکصدم‌ثانیه)ازمحیط‌عادی به‌محیط کرایوجانیك ببریم تاهرمدت که بخواهیم میتوانیم آنرا نگهداری کنیم و دوباره چنانچه بازهم در عرض یك مدت کم آنرا به محیط عادی بر گردانیم‌موجود زنده‌خواهد شد. دراین‌مـورد آزمایشات زیـادی شده که توأم با موفقیت بوده است .

مثلا یکی از راههای نگهداری سرنشین سفینه های فضائی درمسافرت های طولانی‌فضائی اینست که سرنشین‌سفینه را دریك کپسول به‌محیط کرایوجانیك ببرند وپس‌ازطی‌مسیرمسافرت،دوباره‌اورابدون‌اینکه از زمان رفتن به‌محیط کرایوجانیك پیرترشده‌باشد. زنده بکنند .



R=Re	5%	Zn	برای	شده	بینی	پیش
R=Ro+Rg	9%	»	»	»	»	
R=Re	9%	»	»	»	»	
R=Re+Rg	10%	»	»	»	»	
R=Re	10%	»	»	»	»	
R=Rg	20%	»	»	»	»	

REFERENCES

1– Ko Mendelssohn, "Progress in Cryogenic" Academic Press Inc. Publishers, New York, 1964.

2– C. J. Gorter, "Progress in Low Temperature Physics", North Holland Publishing Company, Amsterdam, Volume II.

3– B. D. Henshall," A.Csyogenic Hypersonic Low Density Wind Tunnel" , in "Advances in Cryogenic Enginee- ring", Volume 7, PP. 85.

4– H. Mark & R.D. Sommers, "The Combined Use of Liquid and Gaseous Helium to Provide Near Actual Space Environment", in "Advances in Cryogeme Engineering", Volume 8, PP. 93.

5– T. Li, "Cryogenic Liquids in the Absence of Grevity", in "Advances in Cryogenic Engineering" Volume 7, PP. 16.

6– H. A. Schwettman, P. B. Wilron , "The Applicatien of Superconductivity to Electron Linear Accelerator", in "Advances in Cryogeaic Engineering", Volume 10, PP. 88.

7– S. L. Wipf, "A. Superconducting Direct-Current Generator", in "Advances in Cryogenic Engineering", Volume 9, PP. 342.

8– J. R. Purcell & E. G. Payne, "Superconducting Rectifiers", in "Advances in Cryogentc Engineering", 6, PP. 149.

9. Russell B. Scoott, "Gryogenic Engineering" D, Van Nostrand Co., Inc., New York, 1960.

10– G K. White & S. B.Woods,"Conductivity of Hetallic Cryogenic Materials", in "Advancer in Cryogenic Engineering", Volune 2, PP. 120.

11– Klemens, P. G., "Handbuch der Phystk", PP. 14, 198, 1956.

جدول ۱ــ خواص مکانیکی پلاستیکها

PLASTIC	TEMPERATURE °K درجه حرارت °K	ULTIMATE TENSILE STRENGHT PSI X10⁻³	COMPRESSIVE YIELD STRENGHT PSI X10⁻³	YOUNG'S MODULUS PSI X10⁻⁶
TEFLON (POLYTETRAFLUORO-ETHYLENE)	295	2	—	.06
	195	5.5	—	.26
	153	8	9	.54
	77	15	18.5	.74
	20	—	25	—
	4	—	27	1.0
KEL-F (POLYTRIFLUOROMONO-CHLOROETHYLENE)	293	6.3	—	.26
	198	14.0	—	.62
	77	16.2	—	.84
	4	—	44	—
POLYETHYLENE	300	1.3	—	.02
	4	—	25	—
NYLON	293	7.7	—	.43
	198	20.1	—	.56
	153	24.3	—	.75
	77	27.9	—	1.10