

استفاده از مقاومت مخصوص الکتریکی در شناخت پدیده‌های متالورژی

نوشته :

ولی الله جمفری

استاد یار دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده :

یکی از پدیده‌های فیزیکی که در سالهای اخیر برای بررسی درجه خلوص و شناخت مکانیسم عملیات حرارتی و یا برخی از عملیات مکانیکی مورد استفاده متالورژیست‌ها قرار گرفته مقاومت مخصوص الکتریکی میباشد. بدین جهت در این مقاله نیز سعی شده است اصول آن تا حد امکان بدقت بررسی شود.

مقاومت مخصوص الکتریکی برطبق قانون مساتیسن Mathissen از سه جمله زیر تشکیل یافته است.

$$(1) \quad \rho_T = \rho_i + \rho_r + \rho_m$$

در این رابطه ρ_T مقاومت مخصوص الکتریکی کل، ρ_i مقاومت مخصوص الکتریکی ایده‌آل، ρ_r مقاومت مخصوص باقیمانده و بالاخره ρ_m مقاومت مخصوص مغناطیسی نامیده میشود. اگر از ρ_m که مربوط به اسپین الکترون‌ها است صرف‌نظر کنیم رابطه فوق بصورت زیر خلاصه میشود^(۱).

$$(2) \quad \rho_T = \rho_i + \rho_r$$

(مقاومت مخصوص ایده‌آل) تابعی است از درجه حرارت مربوط به پخش الکترون‌های هدایت توسط فونونها (Phonon) میباشد. بعبارت دیگر مربوط به پخش الکترون‌های هدایت در اثر امواج حاصل از تحریکات حرارتی آنهاست. بنابراین میتوان فرض کرد که پخش الکترون‌ها در اثر این تحریکات، برحسب درجه حرارت، برگشت پذیر میباشد و در فاصله حرارتی معینی تغییرات آن خطی است. با توجه باین مطلب ρ_i در درجه حرارت پائین ناچیز بوده و میتوان از آن صرف‌نظر کرد زیرا تحریکات حرارتی آنها تقریباً صفر است.

ρ_r (مقاومت مخصوص باقیمانده) مربوط به پخش الکترونها در اثر معایب فیزیکی (ماکل ها ، ناپجائیها ، مرزدانه ها و مخصوصاً کمبودهای اتمی و اتمهای بین نشین خودی (Awo—interstitid) و معایب شیمیائی (ناخالصیها خصوصاً اتمهائی که بصورت محلولهای جامد می باشند) است .

ρ برحسب درجه حرارت برگشت ناپذیر میباشد . بنابراین با توجه بمطالب فوق میتوان رابطه خلاصه شده ماتیسن را بشکل زیر نوشت :

$$\rho_T = \rho_i + \int \frac{\partial \rho_r}{\partial T} dT \quad (2)$$

عوامل مؤثر بر روی مقاومت مخصوص الکتریکی :

ازین مهمترین عواملی که روی مقاومت مخصوص الکتریکی اثر میکند (بجز درجه حرارت ، معایب شبکه و ناخالصیها) باید از تنشهای داخلی ، شکل و ابعاد نمونه را نام برد زیرا مثلاً اگر نمونه خیلی نازک باشد پویش آزاد الکترونها در اثر وجود جداره های نمونه کاهش مییابد . بعنوان مثال اگر نمونه بصورت سیم باشد قطر آن اهمیت زیادی در اندازه گیری مقاومت مخصوص الکتریکی خواهد داشت . زیرا این مقاومت معکوساً متناسب باپویش متوسط آزاد الکترونها هدایت است . مطالب فوق در مورد فلزات بسیار خالص اهمیت زیادی پیدا میکنند چون پویش آزاد الکترونها برای نمونه های خالص در درجه حرارت پائین بسیار زیاد است . مثلاً برای آلومینیومی که از طریق ذوب قسمتی بدست آمده است این مقدار در حدود میلیمتر میباشد (در هلیوم مایع) .

در عمل برای اینکه عامل شکل و یا ابعاد نمونه را حذف کنند بجای ρ نسبت مقاومت مخصوص را طبق رابطه زیر تعیین مینمایند .

$$\rho = \frac{\text{درجه حرارت پائین } \rho}{\text{درجه حرارت محیط } \rho}$$

مثلاً :

$$\rho = \frac{\rho_{20,3} \text{ K}}{\rho_{293} \text{ K}}$$

الف - کاربرد مقاومت مخصوص الکتریکی در تعیین درجه خلوص فلزات :

همانطور که در بالا اشاره کردیم اگر درجه حرارت بسیار کم باشد ρ_i بسمت صفر میل میکند و میتوان از آن صرف نظر کرد بنابراین ρ_T فقط به ρ_r بستگی خواهد داشت . برای اینکه بتوان از ρ_i صرف نظر کرد باید اندازه گیری در ازت مایع (77°K) ، هیدروژن مایع (20.3°K) و یا بهتر هلیوم مایع (4.2°K) صورت گیرد .

بعلاوه دیدیم که ρ_r خود تابع معایب فیزیکی و شیمیائی است یعنی :

$$\rho_r = \rho_p + \rho_c$$

بنابراین باید معایب فیزیکی را نیز حذف و یا اقل تا حد امکان کاهش داد. برای این منظور قبل از انجام اندازه گیری باید نمونه را بمدت معین و در درجه حرارت، مشخص باز پخت نمود. بدیهی است درجه حرارت و زمان باز پخت تابع نوع فلز میباشد بعنوان مثال اگر بخواهیم میزان ناخالصی های موجود آلومینیم را تعیین کنیم باید ابتدا آنرا در ۶۰۰ درجه سانتیگراد بمدت ۱۲ ساعت گرم کنیم و سپس در هیدروژن یا هلیوم مایع مقاومت مخصوص الکتریکی آنرا اندازه بگیریم.

رابطه بین مقاومت مخصوص الکتریکی و درجه خلوص فلز

اگر C_i غلظت عنصر i و σ_i ضریب تاثیر این عنصر روی ρ باشد خواهیم داشت (۴):

$$(4) \quad \rho_c = \sum C_i \sigma_i$$

σ_i به قطر اتمی، آرایش الکترونی و بالاخره ظرفیت ناخالصی بستگی دارد و معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ میکروهم تغییر میکند بعنوان مثال این ضریب برای ناخالصیهای آلومینیم بین ۱۰ تا ۸ میکروهم می باشد، عبارت دیگر تأثیر عناصر مختلف روی ρ_c یکسان نیست. چون این فاکتور بسیار متغیر است نمیتوان گفت که ρ_c متناسب با $\sum C_i = C$ است، معهذا برای نمونه هایی که دارای منشاء واحدی میباشند (مثلاً آلومینیم حاصل از الکترولیز) می توان رابطه زیر را نوشت:

$$C_i = K_i C$$

زیرا نسبت $\frac{C_i}{C}$ ثابت میباشد.

K_i فقط تابع منشاء فلز میباشد.

با توجه به روابط فوق خواهیم داشت:

$$(5) \quad \rho_c = C \sum A_i K_i$$

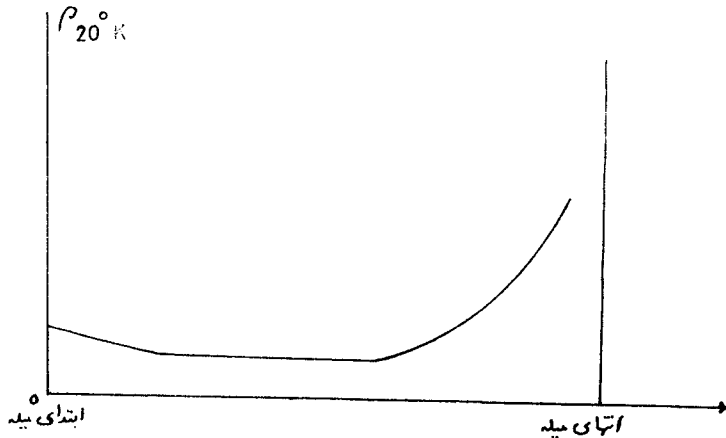
پس اگر منحنی شاهد $\rho_c = f(C)$ را برای فلز داشته باشیم میتوانیم غلظت نمونه را تعیین کنیم. بطور کلی روابطی بدین شکل مقدار ناخالصی را بطور مستقیم بمانمیدهد بلکه باید بکمک منحنیهای شاهد میزان آنرا تعیین نمود. معمولاً از این روش که بسیار سریع و درعین حال دقیق میباشد برای کنترل ناخالصیهای نمونه هایی که دارای منشاء واحدی هستند، مثلاً برای تصفیه آلومینیم، زهر کنیم، مس، کرم، آهن، کبالت و یا نیکل که بطریقه ذوب قسمتی تهیه شده است، مورد استفاده قرار میگیرد (شکل ۱). همچنین برای کنترل رسوب کردن گازها در برخی از فلزات مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲ و ۳) در این روش باید احتیاط های لازم را انجام داد تا بتوان آزمایشها را معتبر دانست (مثلاً اندازه دانه ها، دگرگونی آلوتروپی و غیره را رعایت نمود).

یادآوری میکنیم که در مورد فلزات فرمالتیک رابطه فوق الذکر صادق نیست زیرا اثر مربوط

بخواص مغناطیسی نیز اضافه میشود. در این حالت بجای فرمول فوق باید از رابطه Liv و Vosovski استفاده کرد (۳):

$$\rho_T = K C + \Delta \rho_m$$

در این رابطه $\Delta \rho_m$ افزایش مقاومت مخصوص در اثر میدان مغناطیسی هریک از نواحی مغناطیسی می باشد.



شکل ۱ - تغییرات مقاومت مخصوص الکتریکی در طول یک میله آلومینیم که بروش ذوب منطقه ای یا قسمتی تصفیه می شود. (مأخذ شماره ۱)

ب - تأثیر معایب بلوری روی مقاومت مخصوص الکتریکی : دیدیم که ρ_r از دو جمله ρ_p و ρ_c تشکیل میشود که ρ_p مربوط به معایب شبکه بلوری (کمبودهای اتمی ، نابجائی ها و اتم های بین نشین خودی) است و بر روی مقاومت مخصوص الکتریکی تأثیر زیادی داشته و سبب افزایش آن میگردد. بهمین دلیل نیز برای مطالعه تشکیل و یا حذف این معایب و همچنین اثر بین آنها بکار برده میشود.
 بعنوان مثال میتوان مراحل بازگشت ، ترمیم ، بازپخت و یا برعکس ایجاد این معایب ، کارروی فلز ، تابش (بمباران نمونه ها توسط نوترون ، پروتون و یا سایر ذرات) و بالاخره گرما را بررسی نمود زیرا طبق فرمولهای کلاسیک : افزایش مقاومت مخصوص الکتریکی که توسط هریک از معایب فوق نتیجه میشود عبارتست از (۴) :

$$(۶) \quad \Delta \rho = \frac{m}{Ne^2 \tau}$$

* - اگر v سرعت الکترونی هدایت باشد در مدت dt هر الکترون مسافتی برابر $v dt$ میپیماید و اگر در این مدت این الکترونها یکی از معایب بلوری که مرکز آن در فاصله ای کمتر از $\frac{b}{2}$ قرار گرفته است برخورد کند خواهیم داشت :

$$\varphi dt = \frac{dt}{\tau} = a \frac{v dt}{b} C$$

و بنابراین :

$$\frac{1}{\tau} = a \frac{v}{b} C$$

و اگر در رابطه (۶) مقدار τ را قرار دهیم رابطه (۷) بدست می آید.

در این فرمول m جرم، e بار و N تعداد الکترونهاى هدایت در واحد حجم میباشد τ زمان رهائى (Relaxation) است که طبق رابطه زیر تعریف میگردد.

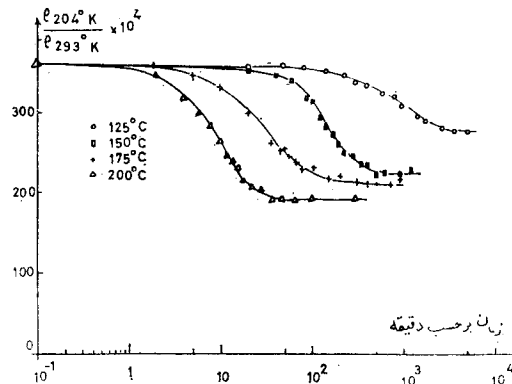
$$\varphi dt = \frac{d\tau}{\tau}$$

φdt احتمال پخش یک الکترون بوسیله یکی از معایب یاد شده در مدت زمان dt میباشد. بعنوان مثال اگر τ را برای معایب نقطه‌ای و یا اتمهائى که در اطراف نابجائى‌ها قرار گیرند در نظر گیریم ملاحظه میکنیم که بر طبق نظر فرمول (Friedel) و با قیاس با اثر ناخالصیها، این معایب میتوانند روی مقاومت مخصوص الکتریکی اثر قابل ملاحظه‌ای داشته باشند*.

$$(v) \quad \Delta\rho \simeq \alpha \frac{mv}{Ne^3b} C$$

در این رابطه C غلظت اتمی معایب، b قطر اتمی و α ضریب برخورد الکترونها تا معایب است مثلاً اگر تمام برخوردهائى که الکترونها با معایب دارند منجر بانحراف و پراکندن آنها گردد α برابر واحد خواهد بود.

پس هر عاملی که سبب پراکندگی الکترونها و در نتیجه سبب کاهش پویش آزاد آنها گردد مقاومت مخصوص الکتریکی را افزایش خواهد داد.



شکل ۲ - تغییرات نسبت مقاومت مخصوص الکتریکی آلیاژ کرم - ازن در هنگام بازپخت ایزوترم (۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰) پس از آبدادن از ۹۰۰°C (مأخذ شماره ۶)

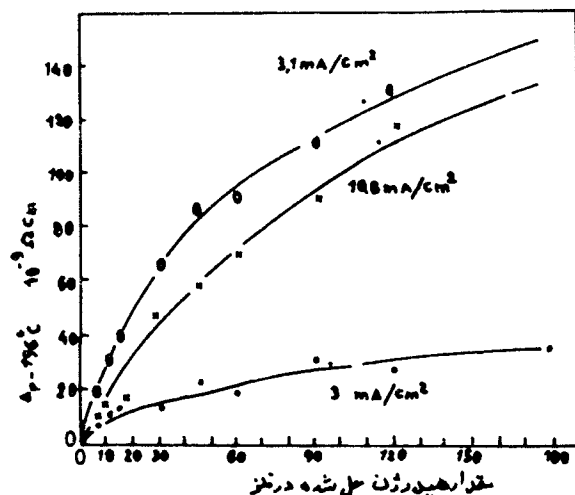
با توجه بمطالب فوق میتوان رابطه (۳) را بشکل زیر نوشت :

$$\rho_T = \rho_i + \int \left[\left(\frac{\partial \rho_L}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial \rho_D}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial \rho_{ei}}{\partial t} \right) \right] dt$$

ρ_L نشان دهنده تغییرات مقاومت مخصوص الکتریکی در اثر کمبودهای اتمی.

ρ_D نشان دهنده افزایش مقاومت مخصوص الکتریکی در اثر نابجائى‌ها

و بالاخره ρ_{ei} اثر کلی اتمهای بین نشین را روی مقاومت مخصوص الکتریکی نشان میدهد. اثر اتمهای بین نشین و اثر تمام پدیده‌هایی را که در اثر حرکت اتمهای بین نشین (مانند کرین، ازت) در فلز بوجود می‌آید (مثلا اثر اتمهای کرین را بر کمبودهای اتمی، متوقف شدن نابجائی‌ها در اثر این اتمها، تشکیل ابرکنترل و بالاخره تشکیل رسوب تطابقی و غیر تطابقی) نشان میدهد.



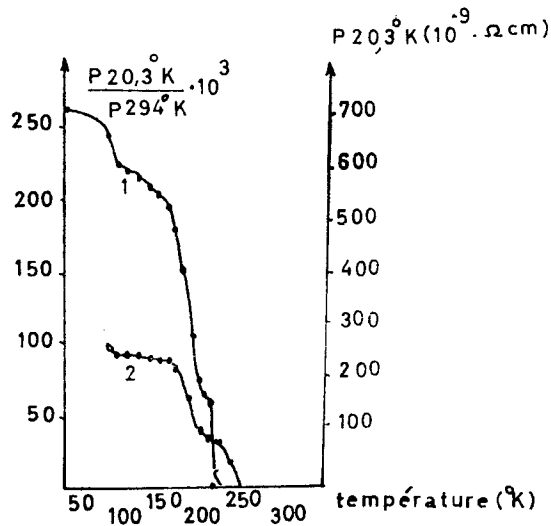
شکل ۳ - تغییرات مقاومت مخصوص بر حسب مقدار هیدروژن محلول در فولاد ماراژینگک (Maraging) مأخذ شماره (۷)

بنابراین چون ایجاد هر نوع عیب در بلور سبب افزایش مقاومت مخصوص الکتریکی میگردد میتوان از آن برای شناخت این مراحل استفاده نمود مثلا در پدیده‌های بازگشت، باز پخت، ترمیم، و یا تبلور مجدد که معایب بلوری حذف و یا کاهش مییابند مقاومت مخصوص الکتریکی نیز کاهش مییابد شکل ۴ و ۵. اضافه‌سی‌نمائیم که هرگونه دگرگونی مانند دگرگونی آلوتروپی و یا مارتنزیتی و یا تبدیل فازها را بیکدیگر میتوان با این روش بررسی و کنترل نمود.

یکی از موارد مهم دیگری را که قابل ذکر است و از مقاومت مخصوص الکتریکی میتوان استفاده نمود تشکیل ذرات رسوب در هنگام بازگشت و یا سایر پدیده‌های متالورژی است.

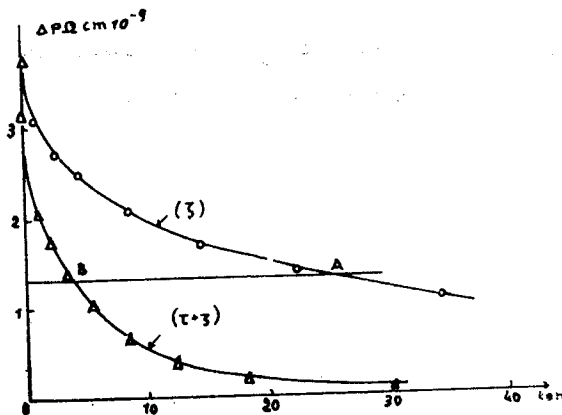
مثلا در هنگام بازگشت مارتنزیت بجای اینکه مقاومت مخصوص تدریجاً کاهش یابد ناگهان آنومالی‌هایی مشاهده میشود و یا بعبارت ساده‌تر مقاومت مخصوص الکتریکی افزایش مییابد شکل ۶.

دلیل این مطلب برطبق نظر Mott تشکیل ذرات رسوبی است که ابعاد آنها با طول موج الکترون‌های هدایت قابل قیاس میباشد و هنگامیکه این رسوبها با الکترون‌ها برخورد میکنند سبب پخش آنها شده و در نتیجه مقاومت مخصوص الکتریکی را افزایش میدهد. ولی Geisler معتقد است که این افزایش در اثر تشکیل رسوب و ایجاد تغییر شکل‌های الاستیک در اطراف رسوب تطابقی در شبکه میباشد



شکل ۴ - مقایسه تغییرات مقاومت مخصوص الکتریکی دو نمونه آلومینیم نورد شده هنگام باز پخت ایزوترم (مدت ۶۰ دقیقه)

- ۱ - نسبت کاهش ضخامت نمونه ۹۷٪ (اندازه گیری در هیدروژن مایع)
- ۲ - نسبت کاهش ضخامت نمونه ۹۶٫۵٪ (اندازه گیری در ازت مایع) (ماخذ شماره ۸)

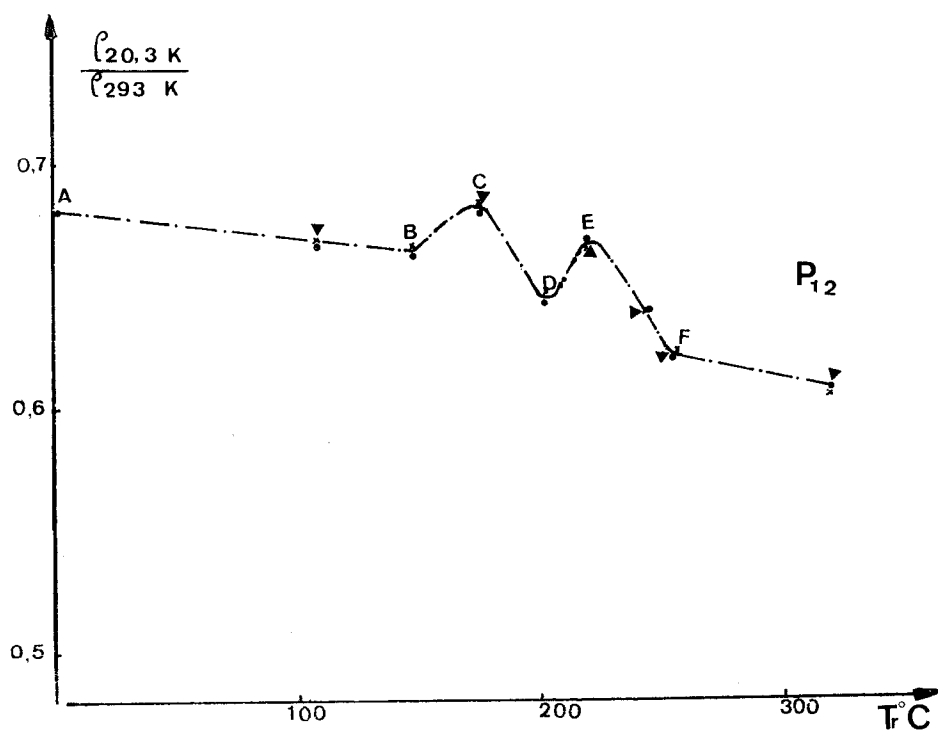


شکل ۵ - باز پخت ایزوترم (در ۴۱ - درجه سانتیگراد) یک نمونه آلومینیم که پس از بمباران توسط ذرات نوترون بدست آمده است $= 3.6 \times 10^{-9} \text{ cm}$

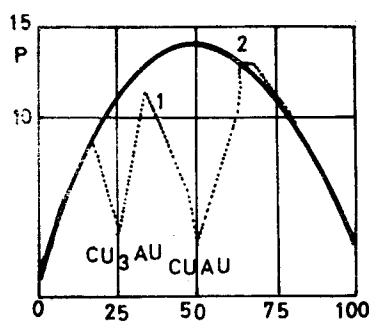
- بدون آبدادن قبلی
- پس از آبدادن قبلی $= 1.18 \times 10^{-9} \text{ cm}$ (ماخذ شماره ۷)

و همین تغییر شکل است که سبب پراکنندگی و پخش الکترونها میگردد. در عوض Fine^(۵) افزایش مقاومت مخصوص را در این حالت بعلت ایجاد نابجائیها در اطراف ذرات رسوب می داند مطلب دیگری که یادآوری آن ضروری بنظر میرسد این است که بکمک این روش میتوان محلولهای جامد منظم و غیرمنظم را نیز از یکدیگر تمیز داد (شکل ۷).

در خاتمه این بحث اشاره میشود که اندازه گیری مقاومت مخصوص الکتریکی را میتوان در حرارت های بالا (بطور ایزوترم یا انیزوترم) برای شناخت برخی از مکانیسم های پیچیده دیگر مثلا دگرگونی مارتنزیتی و یا فرایندهای دیگر متالورژی بکار برد.



شکل ۶ - تغییرات مقاومت مخصوص الکتریکی هنگام باز پخت ایزوکرونیک فولاد مخصوص با ۱۳٪ کرم (باخذ شماره ۹)



شکل ۷ - مقاومت مخصوص الکتریکی آلیاژهای CuAu

- ۱ - محلول جامد منظم (بازپخت در 200°C)
 - ۲ - محلول جامد غیر منظم (در 650°C آبداده شده است)
- ρ برحسب میکرواوم سانتیمتر است شکل از H.Lipson (باخذ شماره ۱۰)

نتیجه - روش اندازه گیری مقاومت مخصوص الکتریکی که یک روش غیر مستقیم میباشد میتواند راهنمای بسیار دقیق و سریعی برای شناخت بعضی از مکانیسم ها و پدیده های متالورژی باشد. ولی برخلاف اشعه X یا تفرق الکترونی نمیتواند ماهیت شیمیائی فازهای تشکیل شده را مشخص کند. همچنین نمیتوان آنومالی های مشاهده شده را مستقیماً باین یا آن پدیده اطلاق نمود بلکه همواره در توجیه مطلب باید احتیاطهای لازم را نمود.

ماخذ

- 1—O. DIMETROV ; Cours d'elaboration des metaux de haute pureté
Paris (1973)
- 2—M. BOURAHLA. These , Paris , (Decembre 1973)
- 3—LIU , VOSOVOSKI. Deuxième thèse de B. Dubois , Paris (1966)
- 4—G.T. MEADEN. Electrical resistance of metals , Heywood. Books
London (1966) , 61
- 5—M.E. FINE. Acta met. 7. (1959) 226
- 6—Mme Francmisse Faudot , M. J. BIGOT. C. R. A. S. DE PARIS , 278
(2 J 1974)
- 7—H.R. GRAY , A.R. TROIANO. Mem , sc , Rev , Met , N 7/8 (1968)
Page 543
- 8—C. FROIS. Acta. MET , 14 (1066) 1328
- 9—V. DJAFARI , B. DUBOIS. Corrosion , Metaux , Industrie. Aparaitre
- 10—A. SY. Metalurgie structurale , (1968). DUNOD