اثر اریانتاسیون بلور برروی سختی زیرکونیوم

دکتر افسر سیار

استادیار گروه متالورژی دانشکدهٔ فنی

مقدمه :

مطلب مورد بحث ما دراینجا بررسی آنانیزوتروپی سختی درتک بلورهای زیرکونیوم میباشد . این بررسی درآزمایشگاه متالورژی ویتری (Vitry) پاریس که وابسته به C.N.R.S. (مرکزملی تحقیقات علمی) فرانسه میباشد توسط نویسنده انجام گرفته است.

اصولاً سختی مقاومتی است که جسم درمقابل نفوذ یک جسم خارجی سخت‌تر از خود نشان میدهد . درآزمایش سختی جسم خارجی سخت‌ترتولید فرو رفتگی برروی سطح فلز مورد نظر میکند. این فرورفتگی یک تغییرشکل پلاستیک است که دراثر ماکل شدن ویالغزش بلورها ایجاد میشود وچون این دو ازقوانین مشخص پیروی میکنند بنابراین سختی نه‌تنها بساختمان بلوری بستگی دارد بلکه اریانتاسیون بلورهای مورد آزمایش نیز درآن مؤثر میباشد. آزمایش نشان میدهد که برای اریانتاسیون‌های مختلف، سختی زیرکونیوم با نیروی ۳۰۰ گرم از ۹۰ تا ۱۰۵۰ کیلوگرم برمیلیمتر مربع تغییرمیکند.

باید درنظر داشت که‌سختی فلز زیرکونیوم به‌مقدار ناخالصی‌های آن نیزبستگی دارد وبهمین جهت اندازه‌گیریهای سختی همگی برروی نمونه‌های یکسان انجام گرفته است. زیرکونیوم مورد آزمایش ازاحیای حرارتی $Zr Cl_4$ بامنیزیوم وذوب مجدد درخلاء بدست آمده است ومقدار ناخالصی‌های آن درجدول (۱) داده شده است.

کارهای انجام شده بمنظور بررسی انیزوتروپی سختی به‌دوقسمت متمایز تقسیم میشود :

۱- تهیهٔ بلورهای درشت زیرکونیوم وتعیین اریانتاسیون آنها توسط اشعهٔ ایکس.

۲- تعیین سختی این بلورها وبررسی اثرات اریانتاسیون بلور برروی سختی.

جدول شماره ۱

انالیز زیرکونیوم (غلظت وزنی برحسب قسمت درمیلیون p.p.m.)

O=۳۰۰	N=۱۵	H=۵	C=۱۵۰	P<۷۵
Si=٤	B<۰٫۵	Al=۵۰	Ca<۲۵	Cr=٤۰
Co<٤	Cu=۷	Fe=۱۲۰	Mg<۲۰	Mn=۱۷
Mo<۱۰	Ni=۵	Pb=۵	Na<۲۵	Ti<۲۰
V<۱۰				

قسمت اول

تهیه‌ومطالعهٔ رادیوکریستالوگرافی بلورهای زیرکونیوم

فلز زیرکونیوم در درجهٔ حرارت عادی دارای شبکه بلوری هگزاگونال با نسبت $\frac{c}{a}$ = ۱٫۵۹۳ میباشد. در ۸۶۲ درجه سانتیگراد زیرکونیوم α هگزاگونال تبدیل به زیرکونیوم β مکعب مرکزدار (Cubique Centré) میشود. راههای معمولی تهیه بلورهای درشت مانند گرم کردن فلز تا حالت مایع و سرد کردن آن باهستگی، روش اکروایسار بحرانی (ecronissage Critiquc) و غیره نتیجه خوبی درمورد زیرکونیوم نمیدهد. برای تهیهٔ بلورهای‌درشت زیرکونیوم از وجود نقطهٔ تغییرشکل استفاده شده است وابتدا نمونه‌رادرمنطقهٔ β وسپس α حرارت میدهند.

۱ـ طرز عمل : نمونه‌های مورد عمل که‌پولی کریستال می‌باشند مکعب مستطیل هائی بابعاد ۵۰ × ۵ × ۵ میلیمتر است که بادقت تمام بروش مکانیکی وپس‌ازآن بروش شیمیائی صیقلی شده است (در محلول HF ۱۰٪ + HNO_3 ۸۵٪) مراحل مختلف تهیهٔ بلورهای درشت زیرکونیوم ازاین قرار است:

الف ـ گرم کردن به‌مدت یک ساعت دربالای منطقهٔ β (درحدود ۱۱۲۰ درجه سانتیگراد) و سپس سرد کردن باسرعت۱۰۰°C/h تادرجه حرارت عادی.

ب ـ گرم کردن به‌مدت ۸۰تا ۱۰۰ساعت در ۸۲۰درجه سانتیگراد یعنی دربالای منطقهٔ α . بعداز اولین گرم کردن ، نمونه‌هارا بروش مکانیکی با کاغذ سمباده وسپس بروش شیمیائی با مخلوط اسید صیقل میدهند. بدین‌طریق برجستگی‌هائی که دراثر تغییرشکل α ⟵ β بهنگام سرد شدن بوجود آمده است از بین میرود. این سری عملیات‌را چندبار تکرار میکنند(درنمونه های مورد آزمایش سری عملیات سه‌بار تکرار شده است) . درپایان عمل اگر زیرکونیوم بحد کافی‌خالص باشد نمونه‌هائی بادانه‌های نسبتاً درشت تهیه‌میشود

که قطر هربلورآن بین ۵ تا ۱۰ میلیمتر تغییرمیکند. درشکل(۱) عکس یک نمونه که بااین روش تهیه شده است دیده میشود.

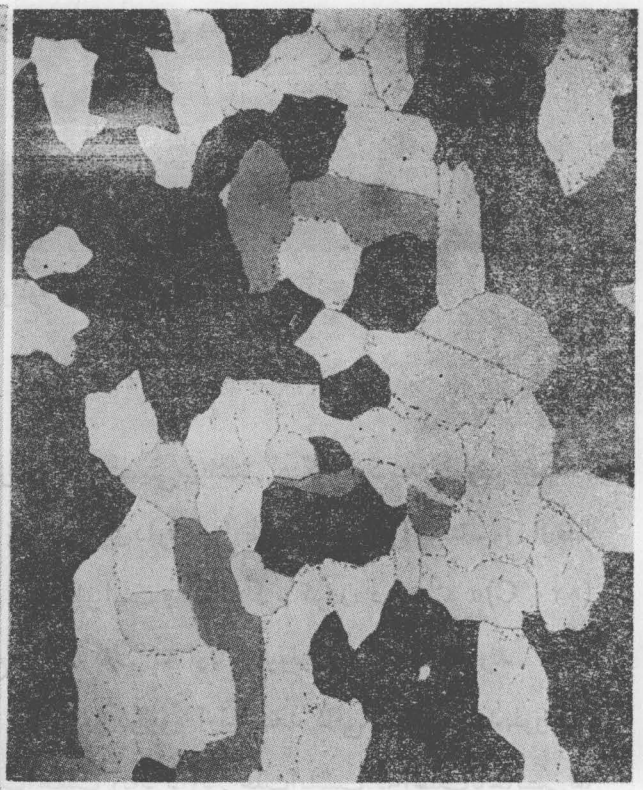
شکل(۱) نمونهٔ زیرکونیوم بادانه‌های درشت

۲ـ آنالیز پدیدهٔ رشد بلورهای درشت.

تغییرشکل زیرکونیوم $\alpha \longrightarrow \beta$ یک‌تغییرشکل مارتنسیتی‌میباشد. هنگام‌سرد شدن‌نمونه ازمنطقهٔ β هربلورفاز β تولیدبلورهایی ازفاز α میکند که بین خود ازلحاظ‌بلوری دارای روابطی‌میباشند(هراریانتاسیون β فقط تولید ۱۲ اریانتاسیون α میکند). کناره بلورهای‌حاصل ناهموار است وهنگام گرم کردن درمنطقه α(۸۲۰°C) بعضی‌ازاین اریانتاسیونها گسترش پیدامیکند وباصطلاح میتوان گفت که اریانتاسیونهای‌دیگررامیخورند. هرچه مدت بازپخت طولانی‌تر باشداین گسترش بیشترمیشود واگر زیرکونیوم اولیه بحدکافی خالص باشدبلورهای درشت تهیه‌میگردد. خلوص فلز درتهیهٔ‌بلورهای درشت‌اهمیت زیاد دارد. علت‌اینست که‌اغلب‌ناخالصی‌ها در درجه حرارت بالا درفاز β حل میشوند و در حین سردشدن و بهنگام تغییر شکل $\beta \rightarrow \alpha$ چون قابلیت انحلال ناخالصی درفاز α خیلی کمتراز فاز β است رسوب میکند.

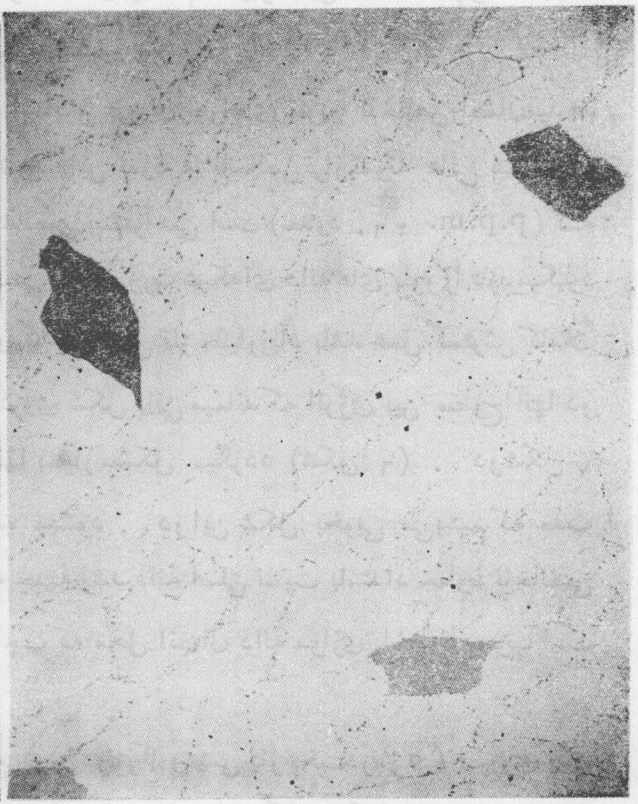
شکل های شمارهٔ ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ نتیجهٔ آزمایش برروی نمونه‌ای تقریباً ناخالص‌رانشان‌میدهد وبهمین‌جهت اثرشبکه حاصل‌از رسوب درآنها دیده میشود (این نمونه‌ها ناخالص‌تراز نمونه هائی هستند که درتهیهٔ بلورهای درشت بکار رفته است). دراینجا ناخالصی بیشترآهن است (حدود ۲۶۰ p.p.m.) که تولید Zr_2Fe میکند. هنگام گسترش بلور، این ناخالصی که بصورت شبکه‌ای دانه های بلور را دربرمیگیرد مانع گسترش بلورها وایجاد بلورهای بزرگ میکردد واگر ناخالصی فلز بسیارزیاد باشد عمل گسترش کاملاً متوقف میگردد. درمراحل آخر فقط بلورهای کوچک کروی شکل باقی میماند که انرژی بین سطوح آنها در محل اتصال کم است و بهمین جهت جذب شدن آنها بسیار مشکل میگردد (شکل ۶). درشکل ۷ اثر ناخالصی درجلوگیری از رشد بلورهای اصلی دیده میشود. دراین شکل بخوبی می‌بینیم که جذب بلورکوچک باقی مانده ازقسمت‌پائین وسمت راست که جبههٔ رشد دانهٔ اصلی نسبت بامتداد خطوط ناخالصی مایل است انجام گیرد. بعکس درقسمت بالای سمت چپ که محل اتصال دانه موازی باخطوط رسوب است جذب بسیار مشکل میشود.

تجربه‌نشان داده‌است که‌باتکرارعملیات(گرم کردن‌درفاز β وسپس باز پخت‌درفاز α) برروی یک نمونهٔ مشخص میتوان بلورهای درشت تهیه نمود. توجیه این پدیده این است که با تکرار باز پخت درفاز β

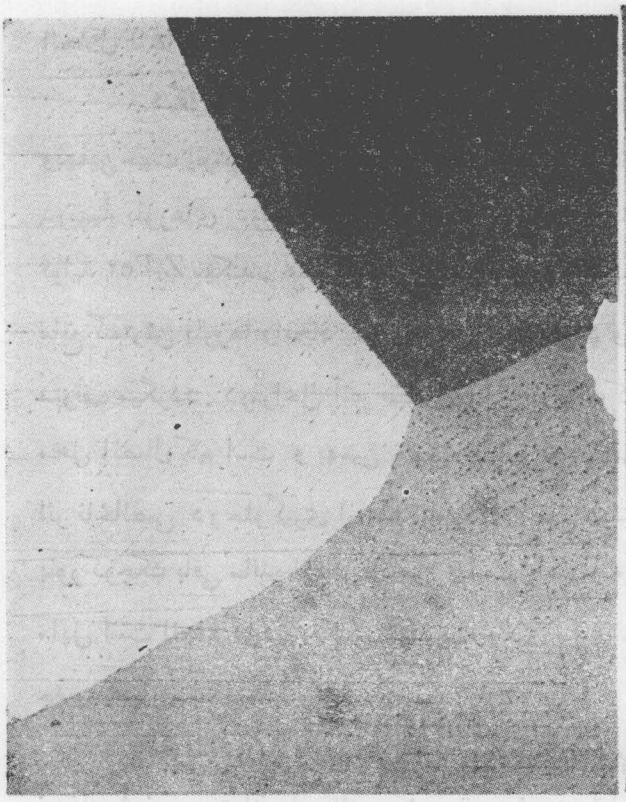


شکل ۲

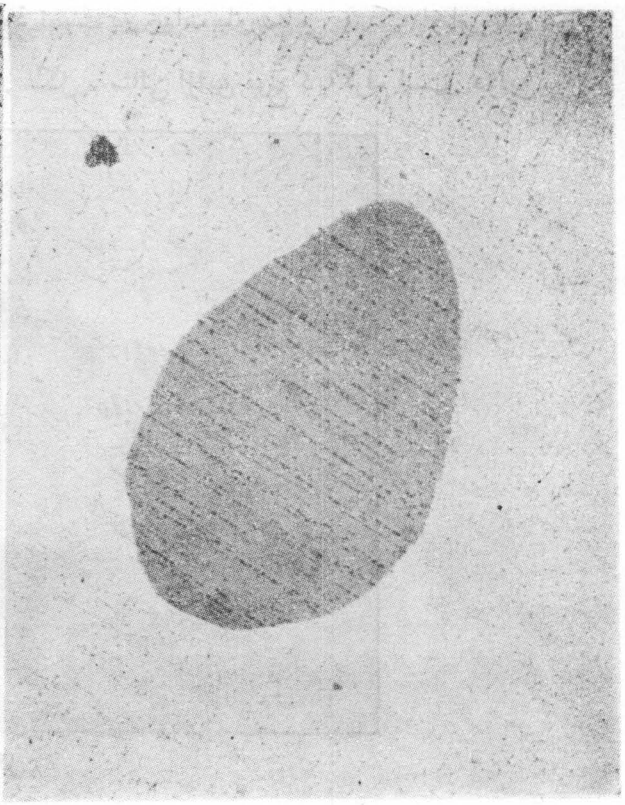
شکل ۳



شکل ٤



شکل ٥



شکل ٦

شکل ٧

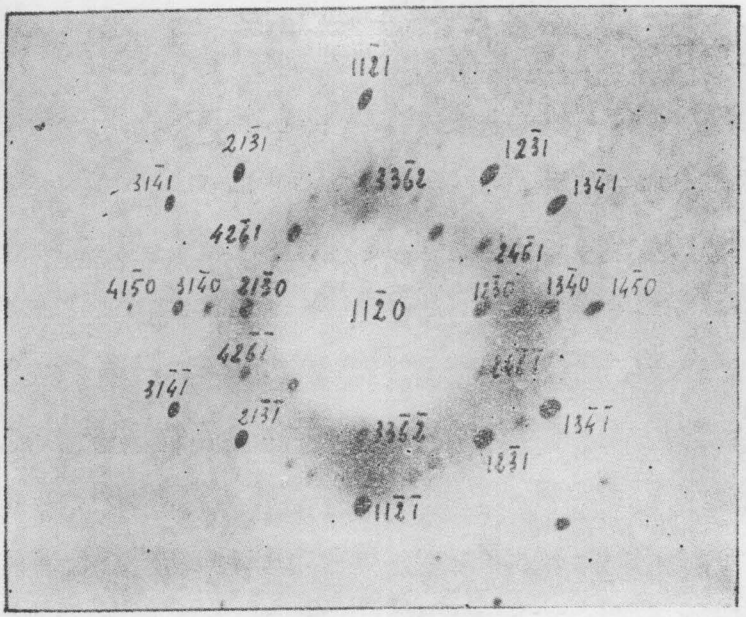
ناخالصی‌ها حل شده ودوباره بطرز جدیدی که برای گسترش بلورها مناسبتر است منتشرمیگردند.

۳ـ تعیین اریانتاسیون بلورهای حاصل.

اریانتاسیون این بلورها توسط اشعه ایکس وبروش لائوئه برگشته (Laue en Retour) تعیین شده است.

این اشعه پلی کروماتیک است واز یک آنتی کاتد مس حاصل شده و بطور عمود برسطح نمونه میتابد. این اشعه‌دراثر برخورد به‌سطوح مختلف رتیکولی برمیگردد وبصورت لکه‌هایی برروی یک فیلم‌مسطح ثبت میشود (شکل۸). این لکه‌ها را که هرکدام مربوط بیکی‌از سطوح بلور می‌باشد بااستفاده ازمقدار زوایای بین سطوح مختلف بلوری که از روی پارامترهای زیرکونیوم هگزاگونال محاسبه میشود نامگذاری میکنند. بکمک دیاگرام‌های‌حاصل ، تصویر فضائی بلورهای موردنظر معلوم میشود. **بدین‌طریق اریانتاسیون بلورهای مختلف ، از روی وضعیت سه محور اصلی بلوری آنها درفضا نسبت به محور های رفرانس معین میگردد. چون نمونه‌ها همگی بشکل منشور مربع‌القاعده میباشند سیستم رفرانس مورد استفاده (xyZ) سه‌محور قائم‌الزاویه مربوط به‌یالهای نمونه میشود.**

دراندازه گیری سختی لازم بود که جهت نفوذ نسبت به جهات بلورشناسی هریک ازبلورهای مورد مطالعه معلوم گردد. (بجدولهای ۲ و ۳ مراجعه شود). شکل ۸ مثالی ازاین نوع دیاگرام است. دراین مورد



شکل ۸

بلور مورد مطالعه بکمک گونیومتر بنحوی درفضا قرار داده شده که سطح (۱۱۲۰) عمود بردسته اشعه ایکس میباشد. دراین دیاگرام تقارن سیستم هگزاگونال بخوبی دیده میشود. تعیین سیستماتیک اریانتاسیون بلورهای تهیه شده نشان میدهد که میتوان تمام اریانتاسیونهای مختلف را داشت. اگر اریانتاسیونی را که عمود برسطح بلور است برروی یک تصویرفضائی استاندارد ببریم می‌بینیم که این نقاط درهمه جا پراکنده میباشد (شکل ۹). همچنین مطالعه رادیوکریستالوگرافی این بلورها نشان میدهد که بلورها بی‌نقص میباشند زیرا لکه های ثبت شده اغلب مشخص و واضح است.

قسمت دوم

تعیین سختی بلورها و بررسی اثر اریانتاسیون بلوری برروی سختی.

قبل از این بررسی مختصری دربارهٔ نحوه اندازه گیری سختی و تئوری های آن ذکر میگردد. برای اندازه گیری سختی از دستگاه های مختلفی استفاده میشود که قسمت نفوذ کنندهٔ آنها باهم اختلاف دارد (دستگاه سختی ویکرز، برینل، کنوپ روکول وغیره).

درکارهائی که شرح داده خواهد شد فقط ازسختی ویکرز استفاده شده است. این سختی را برحسب

نیروی وارد شده به ۳دسته تقسیم میکنند:

— سختی درمقیاس کوچک یا (Microdureté) بانیروئی بین ۱ تاحدود ۱۰۰ گرم.

— سختی بانیروی متوسط بانیروئی ازحدود ۱۰۰ گرم تاحدود ۱۰ کیلوگرم.

— بالاخره برای نیروی بیشتر از ۱۰ کیلوگرم سختی درمقیاس بزرگ ویا (Macrodureté).

دراینجا فقط از دوسختی‌اول ودوم استفاده‌شده است. حسن آزمایش سختی بانیروی بسیارکم دراین است که میتوان سختی قسمت بسیارکوچکی‌را اندازه گرفت وبهمین‌جهت ازآن درمطالعهٔ سختی دانه‌های‌بلور ویا فازهای مختلف موجود دریک نمونه استفاده میشود. عواملی‌که برروی سختی تأثیر میکنند عبارت از حالت وچگونگی سطح نمونه وهمچنین وجود وچگونگی انتشار رسوب است وهرچه نیروی اعمال شده کمتر باشد این تأثیربیشتر محسوس میشود.

۱ـ تعریف وقانون ریاضی سختی ـ سختی D نسبت نیروی وارد شده P برسطح کل‌اثرایجاد شده S میباشد:

$$D=\frac{P}{S}$$

سطح کل چهاروجه هرم (سطح اثر باقیمانده) از رابطهٔ زیر بدست‌میآید:

$$S=\frac{d^2}{2\sin\frac{\alpha}{2}}$$

دراینجا d قطر اثر هرمی‌شکل و α زاویه راس‌هرم ومساوی ۱۳۶ درجه است. بنابراین سختی از رابطه زیرمحاسبه میشود:

$$D=\frac{2P\sin\frac{\alpha}{2}}{d^2}$$

ومقدار D چنین میشود:

$$D=\frac{2P\sin 68^\circ}{d^2}=1{,}8544\,\frac{P}{d^2}$$

اگر d برحسب میلیمتر و P برحسب کیلوگرم باشد، سختی D برحسب $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{میلیمترمربع}}$ بیان میگردد.

قانون کیک (Kick) ـ برحسب آنچه که درباره سختی دیدیم اگر سختی مقدار ثابتی برای ماده درنظرگرفته شود باید رابطهٔ زیر برقرار باشد:

$$P=\left(\frac{D}{2\sin\frac{\alpha}{2}}\right)d^2$$

ویا :

$$P=ad^2$$

که a مقدار ثابت مشخص کننده ماده میباشد. برحسب این رابطه نیروی وارد شده متناسب با مربع قطر اثر تغییرمیکند. تجربه نشان میدهد که برای نیروهای زیاد این قانون صدق میکند. بعکس برای نیروهای خیلی کم بسیاری ازمواد ازاین قانون پیروی نمیکنند یعنی دراین منطقه سختی مستقل ازنیرو نمیباشد. درچنین حالت رابطه میر (Meyer) بکارمیرود:

$$P=ad^n$$

n یاضریب میر ثابتی است که مقدارآن بجنس ماده بستگی دارد ومیتواند مقادیری حدود ۲ وغیرازآن داشته باشد (اگر a درحدود ۲ باشد مشابه باقانون کیک خواهد بود). اگر از رابطه فوق لگاریتم بگیریم خواهیم داشت:

$$\log P=n\log d+\log a$$

بدین طریق بااندازه گیری قطراثر سختی برای بارهای مختلف P و انتقال آنها برروی مختصات لگاریتمی خط راستی حاصل میشود که شیب آن ضریب میر آن نمونه میباشد.

۲ـ نتایج تجربی ـ سختی زیرکونیوم بانیروئی بین ۱۰ تا ۱۰۰ گرم وهمچنین نیروی ۳۰۰ گرم اندازه گرفته شده است. سختی هربلور چندین بار تعیین ومعدل آن همان عدد سختی ذکرشده است. ضریب میرمربوط به زیرکونیوم با نیروی ۱۰ تا ۱۰۰ گرم حدود ۲ است ($n=2$). بدین طریق قانون کیک دراین منطقه صدق میکند ومقدار سختی مستقل ازمقدار ازنیرواست. بعکس نیروی ۳۰۰ گرم برروی همان بلورهای قبلی اعداد دیگری میدهد ودرنتیجه میتوان گفت که بین ۱۰ تا ۳۰۰ گرم دیگر قانون کیک صدق نمیکند و سختی مستقل ازنیرو نیست. جدولهای ۲ و ۳ مقدارسختی بلورهای یک نمونه زیرکونیوم تحت نیروی ۸۰ و ۳۰۰ گرم است. اریانتاسیون جهت نفوذ نسبت به محورهای اصلی بلور نیزمشخص شده است. ازمنتقل کردن مقدارسختی برروی تصویرفضائی استاندارد، شکل ۹ و ۱۰ بدست میآید. دراین دوشکل ناهمگنی سختی بلورهای زیرکونیوم بخوبی آشکاراست ومیتوان نتایج زیررا بیان کرد :

الف ـ میکرودورته (Mirodreté) بلور های مختلف نمونه تحت نیروی ۸۰ گرم بین ۱۰۰ و

جدول شماره۲

میکرو دورته با بار ۸۰ گرم

نمره بلور	اریانتاسیون محور نفوذ کننده			میکرودورته Kg/mm²
	$[00\bar{0}1]$	$[10\bar{1}0]$	$[11\bar{2}0]$	
24	24°	68°30′	66°	182
2	20°	70°	71°	176
5	24°30′	65°30′	67°	165
18	35°30′	60°	55°30′	152
20	29°30′	60°	64°30′	148
28	51°30′	45°	39°	140
14	36°	54°30′	57°	140
12	50°	46°	40°	124
4	50°30′	43°	41°	124
27	72°	20°	27°30′	121
29	58°	37°	34°	115
21	77°	30°	13°	114
31	70°	26°30′	25°30′	113
1	57°30′	44°	33°30′	111
7	64°30′	26°	38°	111
15	70°30′	24°	25°30′	111
17	56°	44°	34°	111
23	62°30′	30°	35°	111
30	67°30′	34°	24°	111
19	68°	33°	23°30′	108
26	77°30′	16°	29°	106
3	78°	12°30′	30°	105
10	74°	26°	18°30′	105
13	75°30′	15°30′	31°	105
22	78°	11°30′	30°	105
8	82°	21°	12°30′	103
11	72°	31°	18°	103
6	80°	10°	30°	100

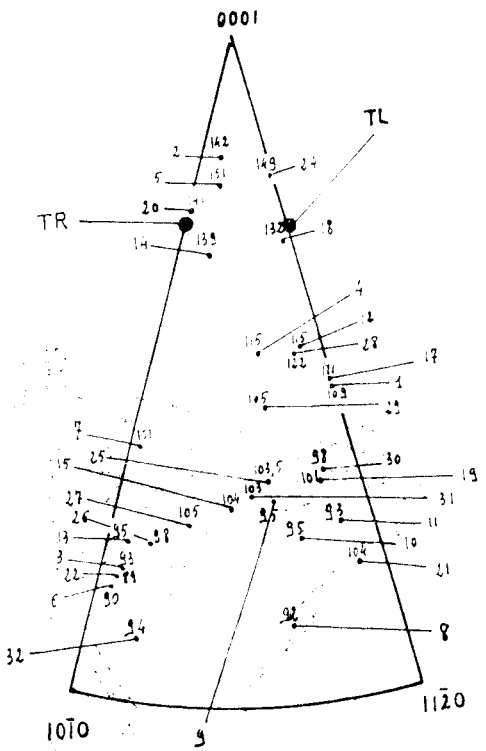
جدول شماره ۳

سختی ویکرس با بار ۳۰۰ گرم

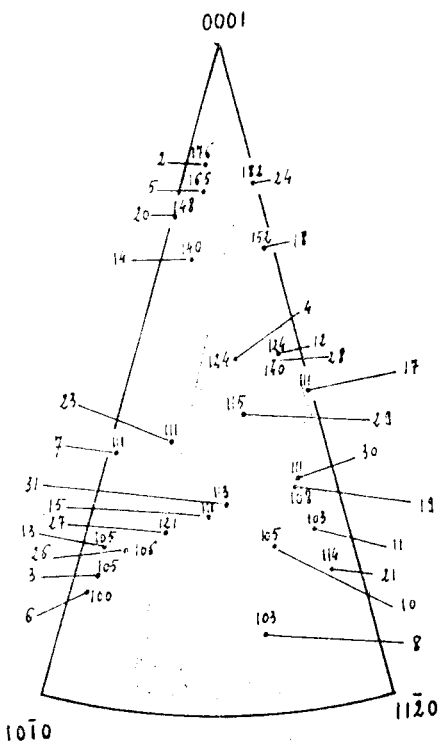
نمرهٔ بلور	اریانتاسیون محور نفوذ کننده			سختی ویکرس
	$[00\bar{0}1]$	$[10\bar{1}0]$	$[11\bar{2}0]$	Kg/mm^2
5	24°30′	65°30′	67°	151
24	24°	69°	66°	149
2	20°	70°	71°	142
20	29°30′	60°	46°30′	141
14	37°	54°30′	57°	139
18	35°30′	60°	55°30′	132
28	51°30′	45°	39°	122
12	50°	46°	40°	115
4	50°30′	43°	41°	115
17	56°	44°	34°	111
1	57°30′	44°	33°30′	109
27	72°	20°	27°30′	105
29	58°	37°	34°	105
15	70°30′	24°	25°30′	104
21	77°	30°	13°	104
25	68°	29°	25°20′	103,5
31	70°	26°30′	25°30′	103
19	68°	33°	23°30′	101
7	64°30′	26°	38°	101
30	67°30′	34°	24°	98
26	77°30′	16°	29°	98
13	75°30′	15°30′	31°	95
9	70°	27°30′	24°	95
10	74°	26°	18°30′	95
32	84°	8°	26°	94
11	72°	31°	18°	93
3	78°	12°30′	30°	93
8	82°	21°	12°30′	92
6	80°	10°	30°	90
22	78°	11°30′	30°	89

۱۸۰ $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{میلیمترمربع}}$ تغییرمیکند. برای همان بلورها وتحت‌بار ۳۰۰ گرم سختی بین۸۶ و ۱۰۵ $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{میلیمترمربع}}$ تغییر می کند (جدول های ۲ و ۳).

ب ـ از روی تصویر فضائی بخوبی تشخیص داده میشود که هرچه سطح بلور به اریانتاسیون سطح قاعده هگزاگونال (۰۰۰۱) نزدیکتر شود سختی بیشترمیگردد. سطوح منشوری ازنوع (۱۰$\bar{1}$۰) و (۱۱$\bar{2}$۰) سختی کمتری دارند (اشکال۹ و ۱۰).



شکل ۱۰



شکل۹

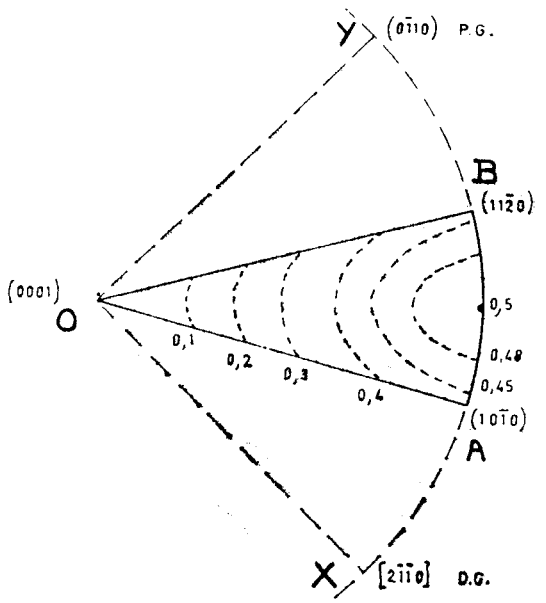
۳ـ تفسیرناهمگنی سختی ـ ناهمگنی سختی زیر کونیوم به پلاستیسیتهٔ شبکهٔ بلوری یعنی نوع رها کردن نیروی وارد شده بستگی دارد. نوع رها کردن نیروها برای اریانتاسیون های مختلف متفاوت است و سبب اختلاف در مقدار سختی میشود. در زیرکونیوم α که هگزاگونال است رها کردن نیروها بدوصورت لغزش وماکل شدن انجام‌میگیرد.

الف ـ رها شدن نیروها توسط لغزش ـ برحسب قانون اشمید (Schmid) هنگامی لغزش حاصل

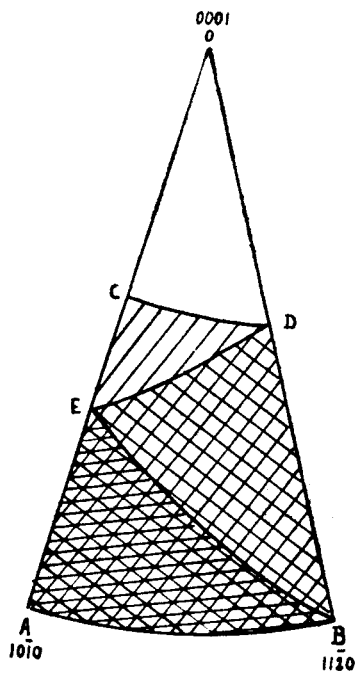
میشود که مقدار نیروی وارد بربلور (E) ازمقدار مشخصی که مقدار بحرانی σ نامیده میشود بیشتر گردد:

$$E \geqslant \frac{\varrho}{\cos\varphi \cos\lambda}$$

φ زاویه بین عمود برصفحهٔ لغزش و امتداد نیروی وارد شده و λ زاویهٔ بین جهت نیروی وارد شده و جهت لغزش است. در زیرکونیوم سه‌سطح لغزش ازنوع $\{10\bar{1}0\}$ وجود دارد ودیرکسیون لغزش ازنوع $<11\bar{2}0>$ است. بین این سه سیستم لغزش سیستمی کـه مقدار E کمتری لازم داشته باشد در مرحلـه اول وارد عمل میشود وهرچه مقدار حاصل ضرب $\cos\varphi\cos\lambda$ بیشتر باشد لغزش ساده‌تر است. با منتقل کـردن مقادیـر حاصل ضرب $\cos\varphi\cos\lambda$ برروی شکل می‌بینیم که این مقداربطور منظم از دیرکسیون [۰۰۰۱] بطرف دیـرکسیونهای $[10\bar{1}0]$ و $[11\bar{2}0]$ افزوده میگـردد و در یک حالت بخصوص ایـن مقدار حداکثر است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱



شکل ۱۲

بعبارت دیگر هنگامی که اریانتاسیون بلور به‌اریانتاسیونهای $(10\bar{1}0)$ و $(11\bar{2}0)$ نزدیک میشود سختی کم میگردد. درنقطهٔ راس (۰۰۰۱) لغزش غیرممکن است یعنی نیروهای وارد شده نمیتواند در اثر لغزش رها شود. درتغییرشکل توسط لغزش پلاستیسیتهٔ فلز نسبتاً بالا است وبهمین‌جهت سختی کم میباشد.

آزمایش میکروگرافی نیزاین موضوع را ثابت میکند. درشکل (۱۳) و (۱۶) که اریانتاسیون بلور به $(10\bar{1}0)$ نزدیک است اثرسطوح لغزش دیده‌میشود. بخصوص درشکل ۱۳ وجود دوسیستم لغزش G_1 و G_2

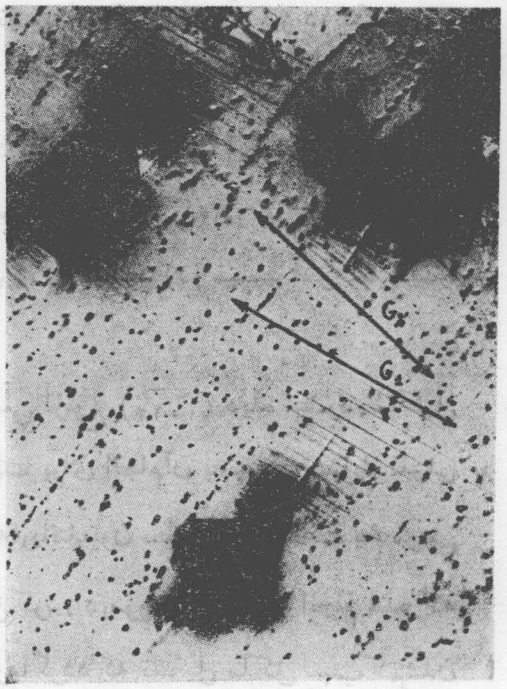
که اثر سطوحی ازنوع $(10\bar{1}0)$ میباشد نشان داده شده است . تصویر فضائی این بلور نیز در شکل ۱۴ دیده میشود .

ب ـ رها شدن نیروها توسط ماکل شدن ـ نیروهای وارد شده میتواند توسط ایجاد ماکل نیزر ها شود وماکل حاصل برحسب اریانتاسیون بلور متفاوت است . سیستمهای ماکل که در زیرکونیوم شناخته شده مربوط به‌سطوحی ازنوع $(10\bar{1}2)$ ، $(11\bar{2}1)$ ، $(11\bar{2}2)$ و $(11\bar{2}3)$ میباشد (دو سیستم آخر کمتر دیده میشود) .

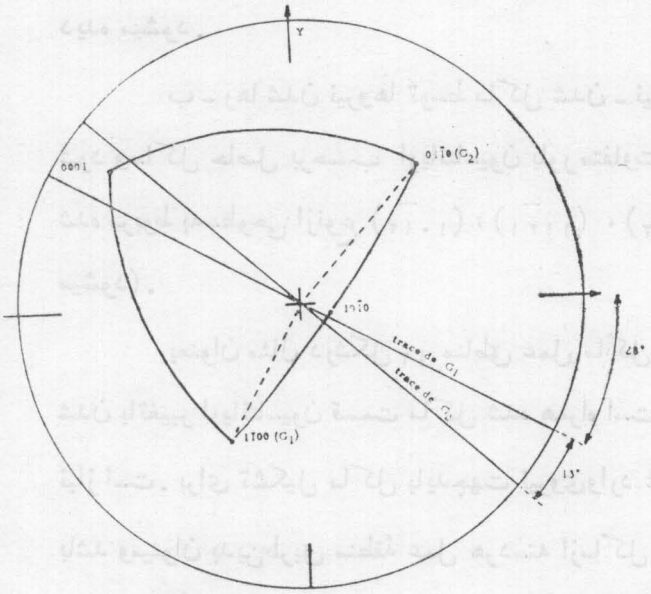
بعنوان مثال درشکل ۱۲ مناطق عمل ماکل های تراکمی ازنوع $(10\bar{1}2)$ دیده میشود . ماکل شدن باتغییر اریانتاسیون قسمت ماکل شده همراه است وبهمین‌جهت برای انجام‌آن به‌نیرویی بیش‌از لغزش نیاز است . برای تشکیل ماکل بایدجهت نیروی‌وارد شده نسبت‌به‌اریانتاسیون سطح بلور درحالت بخصوصی باشد ومیتوان بدین‌طریق منطقهٔ عمل هردسته ازماکل ها را تعیین کرد . درمورد آزمایشهای انجام شده که نیرو سبب تراکم میشودفقط درحالتی نیرو میتواند باماکل شدن رها گردد که تشکیل ماکل سبب کم‌شدن ضخامت بلور تغییرشکل یافته درجهت‌اثر نیرو باشد . هنگامی که جهت نفوذ به‌دیرکسیون $(1\,0\,0\,0)$ نزدیک میشود قسمت اعظم نیروها باتشکیل ماکل رها میگردد (بخصوص ماکل ازنوع $\{11\bar{2}1\}$ که منطقهٔ عمل آنها در دیرکسیون تراکم نزدیک‌به $[1\,0\,0\,0]$ است) . چون‌ماکل شدن تغییرشکل‌مشکلی می‌باشد هنگامی که جهت سطح بلور به‌اریانتاسیون $(1\,0\,0\,0)$ نزدیک‌شود سختی‌افزوده می گردد . درشکل(۱۵)میکروگرافی اثرآزمایش‌سختی برروی‌بلوری که‌اریانتاسیون‌آن‌به $[1\,0\,0\,0]$ نزدیک‌است‌نشان‌داده شده‌است . تغییرشکل بعلت ماکل شدن است ولغزش دیده نمیشود . هنگامیکه تغییرشکل باماکل شدن انجام میشود اثرباقیمانده تقریباً بشکل مربع کامل است درصورتی که درمورد بلورهائی که لغزش انجام می گیرد (نرم می‌باشد) شکل اثر مربع نیست وکشیده می‌باشد (اشکال۱۳ و ۱۵ و ۱۶) .

نتایج کلی

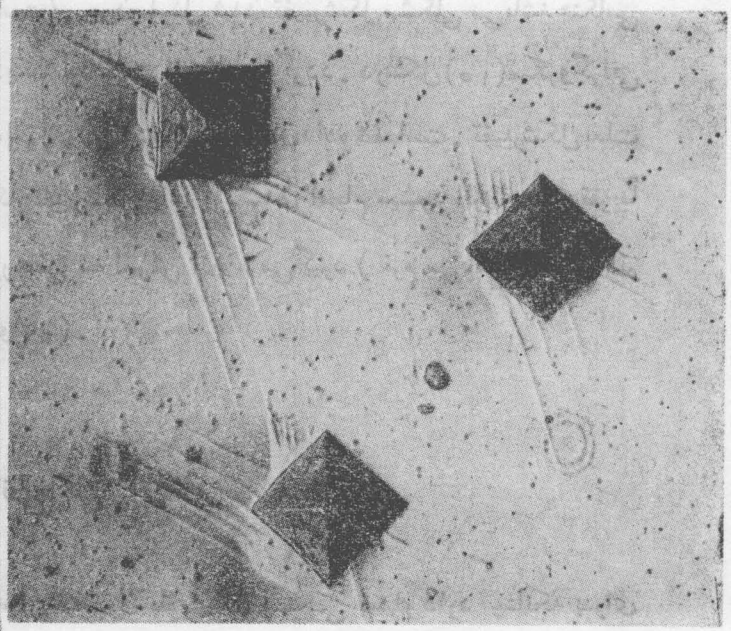
۱ـ سختی زیرکونیوم α هگزاگونال به اریانتاسیون بلوری آن بستگی بسیار دارد چنانکه برای بلورهایی بااریانتاسیون‌های مختلف سختی ویکرز بانیروی ۳۰۰ گرم بین ۸۵ تا ۱۵۰ $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{میلیمتر مربع}}$ وبا نیروی ۸۰ گرم بین ۱۰۰ تا ۱۸۰ $\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{میلیمترمربع}}$ تغییر می کند .



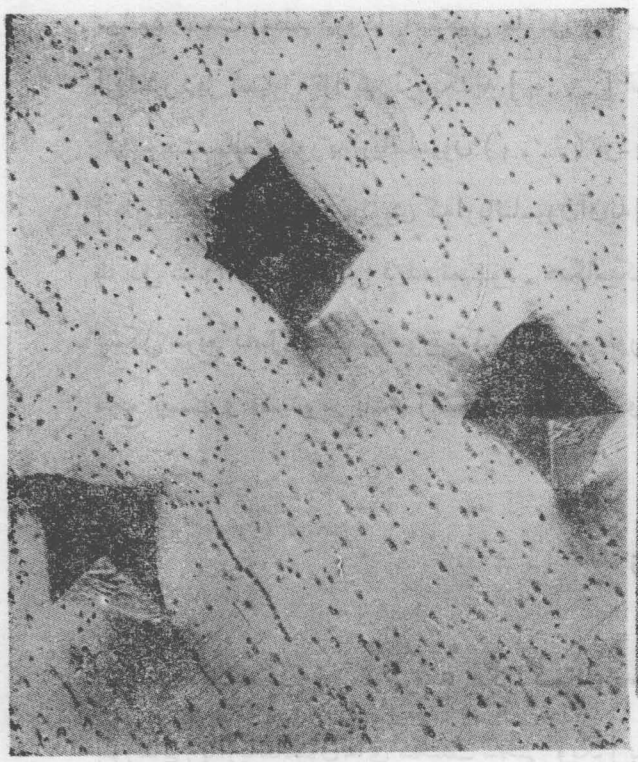
شکل۱۳



شکل۱٤



شکل۱۵



شکل۱٦

۲- همانطورکه دیدیم هرچه سطح بلور به‌اریانتاسیون سطوح (۱۰۰) نزدیکتر باشد سختی بیشتر است. سطوح منشوری‌ازنوع (۱۰۱۰) و (۱۱۲۰)نرمتر می‌باشد.

۳- چون معمولاً مقدار ناخالصی اکسیژن و ازت زیرکونیوم را از روی مقدار سختی نمونه معین می‌کنند وازطرفی همانطورکه دیدیم این سختی تابع اریانتاسیون بلوری نیز می‌باشد باید هنگام اندازه‌گیری سختی بمنظور تعیین ناخالصی کوشش شود که نمونه‌های مورد آزمایش دارای بافت یکسان باشد (مثل نمونه‌های نورد شده که همگی بافت یکسانی دارند).