



منشورات جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

علم المواد

خواصها واختباراتها

الدكتور المهندس

نور وضحية

كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية - جامعة دمشق

الدكتور المهندس

محمد علي سلامة

كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية - جامعة دمشق

الدكتور المهندس

جميل أبو جهجاه

كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية - جامعة دمشق

١٤٣١ - ١٤٣٢ هـ

٢٠١٠ - ٢٠١١ م

جامعة دمشق



المقدمة

كثيرة هي المواد المستخدمة في البحث العلمي ومجالات الصناعة المختلفة ، فالمواد سواء منها المعدنية وغير المعدنية كانت ومازالت الشغل الشاغل للإنسان منذ أن وجد على سطح الأرض ، إذ كان وما زال يبحث في هذه المواد ينقب عنها ويدرس تركيبها وخواصها ويستخلصها من فلزاتها إذا كانت فلزية ويصنعها ويطور في تصنيعها ويبحث عن مواد أخرى لم تكن معروفة من قبل ويحاول تصنيعها والبحث في خواصها واستخدامها . ففي القرن العاشر قبل الميلاد كان معدن الحديد أغلى من معدني النحاس والذهب ولم تستلك السيوف الفولاذية إلا القياصرة في تلك الأزمان . ولم يتوصل الباحثون وحتى هذا التاريخ إلى سر المعالجات الحرارية التي كانت تجري للسيوف القديمة المصقولة من الفولاذ الدمشقي . ومع كل هذا فلم يبرع الانسان في صناعة الخلائط المعدنية وغير المعدنية (كاللدائن وغيرها) وايجاد مجالات كبيرة لاستخدامها مثلما برع في زماننا هذا . ولن يستطيع أي مؤلف أن يجمع في كتاب واحد ما توصلت إليه البشرية من دراسة مكثفة لخواص المواد وأنواعها وتقنية اختباراتها وتصميمها وتصنيعها . لهذا فان جُلَّ عملنا قد انصب في هذا الكتاب على وضع المبادئ الأساسية لفيزياء المواد وبنيتها وخواصها واختباراتها . ولقد أعطينا الجزء الأكبر من اهتمامنا ودراستنا للمواد المعدنية وخلائطها ، أما المواد غير المعدنية (كالخشب والزجاج واللدائن وغيرها) فاننا لم نستفص بدراستها والسبب في ذلك يعود إلى أهمية المواد المعدنية في البحث العلمي والصناعات المختلفة من جهة وإلى وجود مقررات أخرى تبحث في تركيب المواد غير المعدنية وخواصها من جهة أخرى .

ونود أن نذكر طالبنا العزيز في مقدمة هذا الكتاب أن سنواتنا هذه تتميز
بطفرة علمية كبيرة في مجال علم المواد وغيرها من العلوم الأخرى ، وكلما اكتشفت
مادة جديدة تنوعت طرق البحث فيها وتعددت مجالات تطبيقها وظهرت مشكلات لم
تكن معروفة من قبل تتطلب البحث والتنقيب عن خواص أخرى جديدة . لهذا
فإن هناك جزءاً من طرق الاختبار الحديثة لم تتطرق لها وجزءاً آخر تمت دراسته
بشكل مختصر تاركين للطالب تطوير معرفته عندما تستدعي الضرورة لذلك .

المؤلفون

* * *

الفصل الأول

تصنيف المعادن وبنيتها الصلبة

١ - ١ - المعادن :

تعرف المعادن في علم الكيمياء على أنها مجموعة العناصر التي تتوضع في الجزء اليساري من الجدول الدوري للعناصر (انظر الجدول ١ - ١) . فإذا دخلت عناصر هذه المجموعة في تفاعل كيميائي مع العناصر المعدنية فإن الأولى تعطي للأخيرة الكترولونات الخارجية (الكترولونات التكافؤ) ذلك لأن هذه الكترولونات تكون في ذرات المعادن ضعيفة الارتباط بالنوى من جهة وعددها في المدارات الخارجية قليل (١ - ٣ الكترولونات) من جهة أخرى ، بينما عدد الكترولونات في المدارات الخارجية لذرات اللامعادن كبير (٥ - ٧ الكترولونات) .

وتعرف المعادن في الصناعة على أنها المواد التي تتمتع بخاصيتي البريق المعدني واللدونة ولو أن درجات اللدونة تختلف من معدن لآخر . ولقد أعطى العالم السوفييتي لومونوسوف تعريفاً للمعادن على أنها : « أجسام ذات لمعان ويمكن طرقتها » ولم يفقد هذا التعريف معناه منذ مئتي عام وحتى الآن . ولا تتوافر هاتان الخاصتان (اللامعان وقابلية الطرق) عند المعادن النقية مثل النحاس والألمنيوم والحديد وغيرها فحسب وإنما تتعداها إلى الخلائط الأكثر تعقيداً والتي يدخل في تركيبها عدد من المعادن مع كمية ملحوظة أحياناً من عناصر غير معدنية على شكل شوائب وتدعى بالخلائط المعدنية . تتمتع المعادن (عدا خاصيتي البريق المعدني واللدونة) بخاصية

جدول العناصر (جدول العناصر الذرية من 1 إلى 103)									
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II
1 H 1.008									
2 He 4.003									
3 Li 6.941	4 Be 9.012	5 B 10.81							
6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180					
11 Na 22.990	12 Mg 24.305	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	19 K 39.098	20 Ca 40.078
21 Sc 44.956	22 Ti 47.88	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38
39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc 98.906	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41
57 La 138.905	58 Ce 140.12	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm 144.913	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50
71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.084	79 Au 196.967	80 Hg 200.59
87 Fr 223.018	88 Ra 226.025	89 Ac 227.033	90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.048	94 Pu 239.052	95 Am 243.061	96 Cm 247.070
101 Md 288.106	102 No 289.102	103 Lr 260.106							

الناقلية الجيدة للكهرباء والحرارة . ويعود الفضل في الناقلية الجيدة للكهرباء والحرارة عند المعادن للالكترونات الخارجية الضعيفة الارتباط بالنوى والتي لا يقتصر دورها على إحداث التفاعلات الكيميائية بين المعادن والعناصر غير المعدنية وإكساب المعدن صفة البريق واللدونة فحسب وإنما يتعداها إلى الإضفاء على المعدن صفة الناقلية الجيدة للكهرباء والحرارة . والسبب في ذلك يكمن في أن الشوارد الموجبة تتمركز في أماكن محددة في الهياكل الشبكية بينما تشكل الالكترونات الخارجية الحرة غازاً سهل الحركة يسمى عادة الغاز الالكتروني أو الضباب الالكتروني ويتحرك بشكل فوضوي بكل الاتجاهات . فتحت ظروف معينة (أحداث فرق كيون مثلاً بين طرفي قطعة معدنية) فإن حركة الالكترونات ستكون وفق اتجاه محدد ويظهر التيار الكهربائي . وهكذا نلاحظ أنه وعلى الرغم من وجود بعض الاختلاف في مفهوم المعدن كعنصر كيميائي والمعدن ككناية إلا أن هذين المفهومين مرتبطان بخواص البنية الداخلية لذرات المعدن . وقبل أن ندخل في تفاصيل البنية الداخلية للمعادن وذراتها لابد من التعرف على تصنيف المعادن وأهم الأسس المتبعة لإجراء مثل هذا التصنيف .

١ - ٢ - تصنيف المعادن :

يختلف كل معدن عن الآخر ببنية وخواصه ، ومع كل هذا فإنه طبقاً لبعض الصفات يمكن دمج هذه المعادن في مجموعات كما هو أوضح من الجدول (١ - ٢) . ويمكننا قبل كل شيء أن نقسم المعادن إلى مجموعتين كبيرتين هما :

أ - مجموعة المعادن السوداء : وتتميز معادن هذه المجموعة بلونها الرمادي القاتم وكثافتها العالية (باستثناء المعادن ذات الطبيعة القلوية) ودرجة انصهار عالية وصلادة سطحية عالية نسبياً ، وأفضل ما يمثل هذه المجموعة هو معدن الحديد .

ب - مجموعة المعادن الملونة : وتتميز معادن هذه المجموعة بألوانها ، ففيها الأحمر والأصفر والأبيض ، ولها لدونة عالية وقساوة منخفضة ودرجة انصهار منخفضة نسبياً ، وأفضل ما يمثل هذه المجموعة معدن النحاس .

ويمكن في الوقت نفسه أن تقسم مجموعة المعادن السوداء إلى عدة مجموعات على النحو التالي :

١ - المعادن الحديدية : وهي الحديد والكوبالت والنيكل (وتسمى المعادن الفيرومغناطيسية) بالإضافة إلى المنغنيز الذي تعد خواصه قريبة من خواص هذه المعادن . يُستخدم الكوبالت والنيكل والمنغنيز كثيراً كعناصر إضافة في خلائط الحديد وكمعادن أساس في خلائطها المعدنية والتي تشبه بخواصها الفولاذ عالي نسب الخلط .

٢ - المعادن صعبة الانصهار : وهي المعادن التي تكون درجة انصهارها أعلى من درجة انصهار الحديد النقي (أي أعلى من 1539°C) . وتستخدم هذه المعادن كعناصر إضافة في الفولاذ السبائكي وكمعادن أساس عند صناعة خلائط من هذه المعادن .

٣ - المعادن المشعة : وهي مجموعة اليورانيوم والنظائر . وتستخدم هذه المعادن عادة في خلائط الطاقة الذرية .

٤ - المعادن نادرة الوجود في الطبيعة : وهي اللانثانيوم والسيريوم والنيوبيوم والبرازيليوم ... الخ . وترد هذه المعادن جميعها تحت اسم مجموعة اللانثانيوم (أو اللانثانيدات) ، ويشبه معدن الايتيريوم (السكندريوم) هذه المعادن من حيث الخواص .

تتميز هذه المعادن بأن خواصها الكيميائية متقاربة ، ولكن خواصها الفيزيائية (مثل درجة الانصهار وغيرها) فهي مختلفة اختلافاً كبيراً . وتصادف هذه المعادن

- 9 -

المعادن صلبة الإنصهار		المعادن الحديدية	
المعادن الخفيفة		المعادن الخفيفة	
المعادن سهلة الإنصهار		مجموعة اليورانيوم	

في الطبيعة مجتمعة مع بعضها ، ونظراً لصعوبة فصلها إلى عناصر أحادية فانها تستخدم عادةً على شكل خلائط .

٥ - المعادن ذات الطبيعة القلوية : لا تستخدم هذه المعادن بشكل حر باستثناء بعض الحالات (مثلاً استخدامها كنواقل للحرارة في المفاعلات النووية) .

أما المعادن الملونة فتقسم الى :

١ - المعادن الخفيفة : وهي البيريليوم والمغنزيوم والالمنيوم . وتتميز بكثافتها القليلة .

٢ - المعادن الثمينة : وهي الفضة والذهب ومعادن مجموعة البلاتين (البلاتين والبالاديوم والإيريديوم والروديوم والأسسيوم والروتينيوم) . ويسكن أن يُنسب الى هذه المعادن « المعدن نصف الثمين » وهو النحاس . وتتميز هذه المعادن بخاصية أساسية وهي مقاومة الصدأ .

٣ - المعادن سهلة الانصهار : وهي التوتياء والكاديوم والزئبق والقصدير والرصاص والزموت والتاليوم والأنتيموان وعناصر لها خواص معدنية ضعيفة هي الغاليوم والجرمانيوم .

١-٣ البنية الذرية للمعادن :

لا تختلف المعادن عن غيرها من العناصر الأخرى من حيث بنية الذرة ، فلقد أثبتت التجارب العديدة التي أجريت في هذا المجال أن الذرة (سواءً أكانت ذرة معدن أو لا معدن) تتكون من نواة ذات شحنة كهربائية موجبة وتدور حولها وعلى مسافات معينة جسيمات صغيرة جداً ذات شحنة كهربائية سالبة هي

الالكترونات • وسوف نورد فيما يلي وصفاً تقريباً موجزاً لبنية الذرة كما وضعه علماء الفيزياء :

أ - النواة : تتألف النواة من عددٍ من الجسيمات بعضها ذات شحنات كهربائية موجبة وتسمى البروتونات (Protons) وبعضها الآخر لا يحمل أي شحنات كهربائية وتسمى النيوترونات (Neutrons) ، وتربط ما بين البروتونات والنيوترونات جسيمات أخرى أصغر منها تسمى الميسونات (Mesons) تتعادل كتلة البروتون مع كتلة النيوترون تقريباً أما كتلة الميسون فتساوي $200 \div 300$ مرة من كتلة الالكترون • وتشكل أوزان البروتونات والنيوترونات في النواة الوزن الذري للعنصر ، أما عدد البروتونات (والذي يتساوى مع عدد الالكترونات) فيعطي الرقم الذري للعنصر وعلى أساس الرقم الذري هذا يجري ترتيب العناصر في الجدول الدوري • وتتحدد الخواص الكيميائية للعنصر بمقدار شحنة ذرته - أي بمقدار ما تحتوي عليه الذرة من البروتونات والالكترونات ، غير أن اختلاف عدد النيوترونات بين نواة ونواة أخرى للعنصر نفسه يؤدي الى تباين في الأوزان الذرية لذرات هذا العنصر ، لهذا تسمى ذرات العنصر الذي يبقى فيها كل من الرقم الذري والخواص الكيميائية بدون تغيير بينما تختلف فيما بينها بأوزانها الذرية النظائري (Isotopes) .

يقدر قطر النواة بنحو $10^{-13} \div 10^{-12}$ سم وهو صغير جداً بالنسبة لقطر الذرة الكلي والذي هو من مرتبة الأنفستروم (أي 10^{-8} سم) .

ب - الالكترونات : ذكرنا آنفاً أن الالكترونات هي جسيمات صغيرة جداً شحنتها الكهربائية سالبة • ولقد أثبتت تجارب العالم الفيزيائي ميلليكان (Millikan) أن شحنة الالكترون السالبة تساوي شحنة البروتون الموجبة وأن مقدار هذه الشحنة هو :

$$e = 4,802 \cdot 10^{-10} \text{ elect. st. u.} = 1,602 \cdot 10^{-10} \text{ Coulomb} \quad (1.1)$$

ولقد ساعد إيجاد قيمة هذه الشحنة وشحنة الوزن المكافئ الغرامي الواحد لأي عنصر وفق تجارب كولومب (Coulomb) على حساب عدد الذرات الموجودة في ذرة غرامية واحدة :

$$N = \frac{F}{e} = 6,024 \cdot 10^{23} \quad (1.2)$$

حيث : N - عدد الذرات في الذرة الغرامية الواحدة (ويسمى عادةً رقم أفوغادرو) •

F - شحنة الوزن المكافئ الغرامي الواحد لأي عنصر وتساوي
• (96493 Coulomb)
 e - شحنة الإلكترون •

أما إيجاد قيمة الشحنة النوعية للإلكترون تجريبياً (أي أن :
• $\frac{e}{m_e} = 5,274 \cdot 10^{17} \frac{\text{elect.st.u.}}{g}$) فقد ساعد في حساب كتلة الإلكترون :

$$m_e = \frac{4,802 \cdot 10^{-10}}{5,274 \cdot 10^{17}} = 9,106 \cdot 10^{-28} g \quad (1.3)$$

وبما أن كتلة البروتون (أي كتلة ذرة الهيدروجين كون نواتها تحتوي على بروتون وحيد ولا تحتوي على أية إلكترونات) فهي $m_p = 1,673 \cdot 10^{-24} g$ فانه يمكننا أن نقول إن كتلة الإلكترون تساوي $\frac{1}{1836}$ من كتلة البروتون •

تتحرك الإلكترونات حول النواة في نوعين من الحركة :

٤١ - حركة دورانية حول النواة في مدارات دائرية أو بيضوية .

٤٢ - حركة كل الكترون حول محوره .

ولقد عد العالم الفيزيائي راذرفورد (Rutherford) أن نظام الذرة هو أشبه مايكون بنظام المجموعة الشمسية أي أن النواة تدور حول نفسها وكل الكترون يدور حول نفسه من جهة ويدور حول النواة على مدار خاص به من جهة أخرى وأن قوة التجاذب بين الالكترون والنواة تتوازن مع القوة الطاردة المركزية الناجمة عن حركة الالكترون الدورانية حول النواة ، أي أن :

$$\frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e \cdot v^2}{r} \quad (1.4)$$

غير أن تصور راذرفورد هذا لم يكن كافياً لإبراز خواص الذرة كافة أو تفسير بعض الظواهر مثل ظاهرة ثبات الذرة ، إذ من المعروف حسب قوانين الالكتروديناميك أن كل جسم ذي شحنة كهربائية ويتحرك بسرعة متغيرة القيمة أو الاتجاه يطلق إشعاعاً وتتناقص قدرته باستمرار ، أي أنه يجب على الالكترونات ذات الشحنة السالبة والتي تدور حول النواة أن تشع وتخسر من قدرتها باستمرار لتتساقط في النهاية متلاشية في نواة الذرة غير أنه لا يحدث شيء من هذا القيسل بل إن الذرة من هذه الناحية مستقرة . ومن جهة جهة أخرى لو كانت العلاقة (1.4) هي وحدها الصحيحة لكان أي الكترون يستطيع أن يدور حول النواة على أي مدار بأي قطر إلا أن هذا أيضاً لا يحدث بل إن لكل الكترون مداره المحدد .

أقـد أكـمل العالم الفيزيائي بور (Bohr) تصور راذرفورد السابق من خلال وضعه للنظرية الكمية للذرة والتي تتلخص في مبدئين اثنين :

١ - المبدأ الأول لبور : لكل الكترون مداره المحدد الذي يدور عليه دون أن يكتسب هذا الالكترون أي طاقة أو أن يفقد من طاقته شيئاً . وتحدد مدار كل

الالكترون الفرضية التالية : إن العزم الحركي للالكترون أثناء دورانه حول النواة يجب أن يساوي الأضعاف الصحيحة لثابت بلانك ، أي أن :

$$m_e \cdot v \cdot r = \frac{n h}{2 \pi} \quad (1.5)$$

حيث : n - رقم الغلاف ويساوي أعداداً صحيحة •

h - ثابت بلانك (Planck) وقيمه : $h = 6,625 \cdot 10^{-27} \frac{\text{erg}}{\text{sec.}}$

وعلى هذا الأساس ومن العلاقتين (1.4 و 1.5) يمكننا أن نوجد كلاً من نصف قطر المدار الذي يتحرك عليه الالكترون (r) وسرعة هذا الالكترون (v) ، أي أن :

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{4 \pi^2 m_e \cdot e^2} \quad (1.6)$$

$$v_n = \frac{2 \pi e^2}{n \cdot h} \quad (1.7)$$

٣ - المبدأ الثاني لبور : ينتج اختلاف في قدرة الالكترون عند قفزه من مدار إلى آخر وتبدو هذه القدرة على شكل إشعاع • ولكن لمعرفة مقدار القدرة المفقودة أو المكتسبة عند انتقال الالكترون من مدار إلى آخر يجب أن نعرف مقدار القدرة الكامنة والقدرة الحركية للالكترون على كل من المدارين ، فالقدرة المخزنة للالكترون في المدار n هي العمل اللازم لإنجازه لنقل الالكترون من مدار واقع في اللانهاية الى المدار الذي نصف قطره r_n ، أي أن :

$$E_{pn} = \int_{\infty}^{r_n} p \, dr = \int_{\infty}^{r_n} \frac{e^2}{r^2} \, dr = - \frac{e^2}{r} \quad (1.8)$$

أما القدرة الحركية للإلكترون فهي :

$$E_{Kn} = \frac{m_e \cdot V^2}{2} = \frac{e^2}{2r} \quad (1.9)$$

وهكذا فإن القدرة الكلية للإلكترون في المدار n هي :

$$E_n = E_{pn} + E_{Kn} = -\frac{e^2}{r} + \frac{e^2}{2r} = -\frac{e^2}{2r} \quad (1.10)$$

وبتبديل قيمة r في العلاقة (1.6) من العلاقة (1.10) نحصل على :

$$E_n = -\frac{2\pi^2 e^4 m_e}{n^2 h^2} \quad (1.11)$$

فإذا فرضنا أن الإلكترون سوف ينتقل من المدار $(n+1)$ إلى المدار n فإن مقدار القدرة التي يجب أن يفقدها على شكل إشعاع هي :

$$E_{n+1} - E_n = \frac{2\pi^2 e^4 m_e}{h^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right) = h\nu = h \frac{C}{\lambda} \quad (1.12)$$

حيث : ν - تردد الإشعاع الناتج •

C - سرعة الإشعاع وتساوي عادةً $(C = 3 \cdot 10^{10} \frac{cm}{sec})$ •

λ - طول موجة الإشعاع •

ومنه يمكن إيجاد قيمة تردد الإشعاع :

$$\nu = \frac{2\pi^2 e^4 m_e}{h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right) \quad (1.13)$$

وبتقسيم مجموعة الثوات الموجودة أمام القوس على سرعة الاشعاع نحصل على ما يسمى ثابت ريدبرغ (Rydberg) :

$$R = \frac{2 \pi^2 e^4 m_e}{h^3 \cdot C} \quad (1.14)$$

من هذا كله يمكننا أن نقول أن النظرية الكمية لبور قد وفرت كل العلاقات والقيم اللازمة لدراسة الالكترون في حركته حول النواة دراسة كاملة • ونوجز فيما يلي إمكان هذه الدراسة :

١ - يمكن استخدام العلاقتين (1.6 و 1.7) في إيجاد كل من نصف قطر المدار الرئيس الذي يتحرك عليه الالكترون وسرعة هذا الالكترون كما ذكرنا آنفاً • فمثلاً يمكن تمييز حركة الالكترون الوحيد في ذرة الهيدروجين (أي سرعته ونصف قطر المدار) إذا افترضنا الثابت في هاتين العلاقتين $n = 1$ ، حيث نجد أن :

$$r_1 = 0.53 \cdot 10^{-8} \text{ cm} \quad \text{و} \quad v_1 = 2.2 \cdot 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sec.}}$$

٢ - لقد تبين أن الالكترونات التابعة للمدار الرئيس الواحد ذي الرقم n غير متساوية تماماً بالقدر المختزنة في كل منها ويتعلق مقدار هذه القدرة بأربعة عوامل هي :

أ - الرقم الكمي الرئيس : وهو الرقم الكمي الذي يشير الى المدارات الرئيسة (أو الأغلفة الرئيسة) ذات الرقم n ، ويرمز للأغلفة الرئيسة بالرموز $N, M, L, K \dots$ الخ وذلك حسب قيمة n ، حيث K هو الغلاف الرئيس الأول (أي الأقرب الى النواة) وذلك عندما $n = 1$.

ب - الرقم الكمي الثانوي : وهو الرقم الكمي الذي يشير الى المدارات

الثانوية التابعة للغلاف الرئيس الواحد ، ويرمز لهذا الرقم بالرمز l ، حيث :
 $l = 0, 1, 2, \dots (n-1)$. ويرمز للمدارات الثانوية بالرموز f, d, p, s .

ج - الرقم الكمي المغناطيسي : وهو الرقم الكمي الذي يميز تأثير الخواص المغناطيسية للالكترونات في مقدار قدرته ، ويرمز لهذا الرقم بالرمز m ، ويمكن لهذا الرقم أن يأخذ قيمة تتراوح بين $-l$ ، l + مروراً بالصفر ، أي أن مجموع ما يمكن أن يأخذه من قيم هو :

$$m = 2l + 1 = 2(n - 1) + 1 = 2n - 1$$

د - رقم الفتل : وهو الرقم الكمي الذي يميز أن دوران الالكترون حول نفسه يتطابق أو لا يتطابق مع اتجاه دورانه حول النواة . ويرمز لهذا الرقم بالرمز s وقيمته تساوي : $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$.

وهكذا نرى أن لكل الكترون أربعة أرقام كمية تميزه ، فلو أخذنا هذه الأرقام بعين الاعتبار وتقيدها ببدء باولي (Pauli) الذي ينص على أنه لا يمكن أن يكون لالكترونين أو أكثر الأرقام الكمية الأربعة نفسها ، لاستطعنا وبكل سهولة أن نتتبع كيفية توزيع الالكترونات على الأغلفة الرئيسة والمدارات الثانوية التابعة لها .

١ - البنية البلورية للمعادن :

يمكن لأي مادة أن توجد في إحدى ثلاث حالات وهي : الحالة الصلبة والحالة السائلة والحالة الغازية ويجب أن نعلم أنه عند درجات حرارة عالية جداً (عشرة

آلاف درجة أو أكثر من ذلك) تتحول المادة من الحالة الغازية الى حالة البلازما والتي تتميز بازدياد عملية التأين حتى إن الغلاف الالكتروني للذرة يتفكك . ولكن من الخطأ (وهذا ما يعده الكثيرون أحياناً) عدّ حالة البلازما هي الحالة الرابعة للمادة . فلو اعتمدنا البلازما هي الحالة الرابعة للسادة لكان تحول الغاز الى بلازما يجب أن يتم حتى نهاية عملية التأين في درجة حرارة وضغط ثابتين وطبقاً لنظرية الطور^(١) لمجموعة ذات عنصر واحد ، وهذا ما لا يتم بالفعل كون هذا التحول ليس تحولاً طورياً .

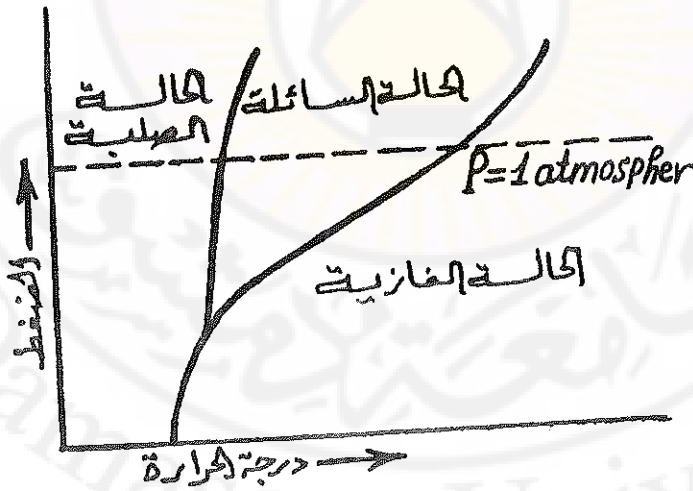
تحتفظ المادة الصلبة على شكلها تحت تأثير قوى الجاذبية ، بينما تتوزع المادة السائلة وتأخذ شكل الإناء الذي توضع فيه . ولكن هذا التعريف لا يكفي لوصف حالة المادة . فمثلاً يلين الزجاج الصلب عند تسخينه وبالتدريج يتحول الى سائل . ويتم التحول المعاكس أيضاً بالتدريج - أي ان الزجاج السائل بانخفاض درجة حرارته يبدأ بالتجمد وفي النهاية يتصلب . وهذا يعني أنه لا توجد درجة حرارة معينة يتحول عندها الزجاج من الحالة السائلة الى الحالة الصلبة ، وليس له له نقطة تحول مفاجيء في خواصه .

إن التحول من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة وبالعكس يتم عند درجة حرارة معينة ، وترافق هذا التحول تغيرات مفاجئة في الخواص . وينطبق هذا أيضاً على التحول من الحالة السائلة الى الغازية . والسؤال الذي يطرح الآن هو: ما الفرق بين الحالات الغازية والسائلة والصلبة إذا ؟ نحن نعلم أنه لا يوجد لتوضع جزيئات الغاز أي قانون ، فهي تتحرك دائماً بشكل فوضوي وتتدافع فيما بينها، فالغاز يميل الى أن يشغل عادةً أكبر ما يمكن من الحجم . وفي الأجسام الصلبة

(١) - سوف نتحدث عن هذه النظرية في الفصل الخامس (البند ٥ - ٨) .

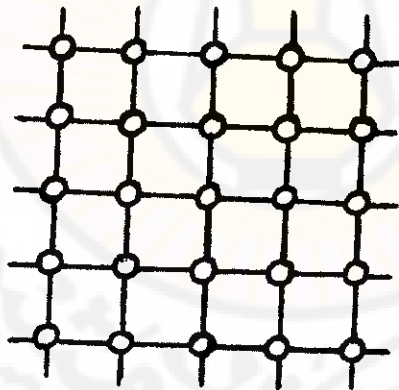
فان نظام توزيع الذرات محدد وقانوني ، إذ تتساوى قوى التجاذب والتنافر بين الذرات ، ولهذا يحافظ الجسم الصلب على شكله . أما في السوائل فان الذرات (أو الجزيئات) تحافظ على ما يسمى أقرب انتظام لها - أي أنه تتوضع عادةً وبشكل منتظم كمية غير كبيرة من الذرات في الفراغ ، ويكون عدد الذرات هذه أقل منها عند الجسم الصلب وللحجم نفسه . ويعد « أقرب انتظام » حالة غير مستقرة فهو يظهر أحياناً ويختفي أحياناً أخرى تحت تأثير التغيرات الحرارية . ولذا فان الحالة السائلة - هي حالة وسطى بين الحالتين الصلبة والغازية . فعند شروط معينة يمكن أن يتم التحول مباشرة من الحالة الصلبة الى الحالة الغازية دون المرور بالحالة السائلة (sublimation) - انظر الشكل (١ - ١) .

إن التوضع المنتظم والصحيح للذرات (أو الجزيئات) في الفراغ هو ما يميز البنية البلورية . ولذا يتساوى في علم الفيزياء مفهوم الحالة البلورية والحالة الصلبة للمادة ، إذ تعد المواد الأمورفية (مثل الزجاج) مواد سائلة برّدت تبريداً مفرداً .



شكل (١ - ١) مجالات وجود الحالات الصلبة والسائلة والغازية بتغير درجة الحرارة والضغط

إن البنية البلورية للمعادن معروفة تقريباً منذ القرن الثامن عشر إلا أن أحداً لم يستطع إثبات ذلك عملياً . حتى بعد عام ١٩١٢ بعد أن أمكن التحقق من ذلك بواسطة الأشعة السينية وأصبح من المسلم به أن كل معدن مهما اختلفت ظروفه فإنه في درجات الحرارة الواقعة تحت درجة انصهاره يكون ذا بنية بلورية أي أن ذرات أي معدن في الحالة الصلبة تكون منتظمة إلى جانب بعضها على مسافات ثابتة وبأشكال هندسية محددة ومنتظمة تكرر نفسها بالاتجاهات الثلاثة لتشكيل البلورة المعدنية . وأصغر شكل هندسي فراغي يتشكل بين الذرات يعد وحدة للتمييز بين أشكال البلورات أو التبلور المختلفة ويطلق عليه اسم الخلية البلورية أو الهيكل الشبكي للبلورات ، والبلورة كما ذكرنا ماهي إلا تكرار لهذه الخلايا أو الهياكل بترافقها إلى جانب بعضها بعضاً في مختلف الاتجاهات ، إذن فكل ذرة من ذرات المعدن تحتل نقطة معينة في مكان محدد من الخلية البلورية (انظر الشكل ١ - ٢) .



شكل (١ - ٢) : خلية بلورية بسيطة

وبما أن الذرات ليست أجساماً صماء بل إن الذرة كما رأينا تتألف من نواة يتركز فيها وزن الذرة كاملاً تقريباً ويدور حولها عدد من الإلكترونات على مدارات مختلفة . لذلك فعندما نحدد مكان الذرة في الهيكل الشبكي نكون قد حددنا

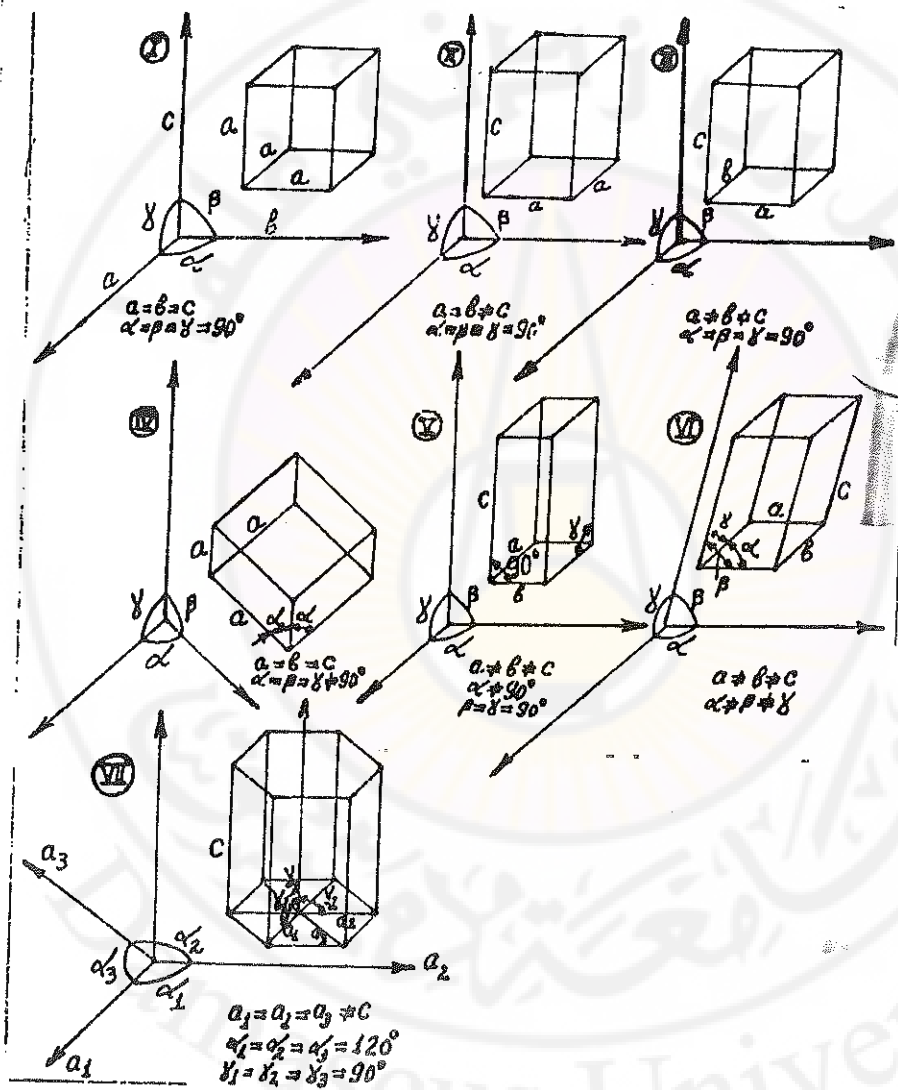
المكان الذي تتمركز فيه نواة الذرة . ولكن يجب أن لا يتبادر إلى أذهاننا أن هذا التحديد لأماكن الذرات في الهياكل الشبكية يعني أن الذرات أو بالأحرى نوى هذه الذرات ثابتة ومستقرة في أماكنها هذه كقطع الطوب في الجدار بدون أدنى حركة لأن الذرة بمجموعها أي النواة وما يتبعها من الإلكترونات تكون في حركة اهتزازية دائمة بسبب الحركة الدورانية للإلكترونات ، والنقطة التي حددناها في الهيكل الشبكي ماهي إلا المكان الوسط أو المركز الذي تهتز حوله الذرة . والحركة الاهتزازية هذه تساعد على حدوث العديد من الظواهر الفيزيائية التي سنتعرض لها فيما بعد مثل الانتشار أو التسرب أو تغيير الذرات لأماكنها وانتقالها من هيكل إلى آخر وانصهار المعدن وغيرها .

١ - ٥ الهياكل الشبكية للمعادن :

لقد ذكرنا سابقاً أن أهم ما يميز البنية البلورية للمعادن هو التوضع المنتظم للذرات في الفراغ . وهذا يعني أن كل ذرة في الهيكل الشبكي تحاط بعددٍ متساوٍ من الذرات التي تتوضع على مسافات متساوية من هذه الذرة .

إن ميول ذرات المعدن لأن تتوضع بأقرب ما يمكن من بعضها بعضا يعني أن عدد أشكال هذا التوضع المتبادل لذرات المعدن يكون غير كبير .

هناك عدد من المخططات والطرق التي نستطيع بها أن نرسم نماذج التوضع المتبادل لذرات الهيكل الشبكي . ويبين الشكل (١ - ٣) كيف تتوضع الذرات في عقد مستوى يسمى المستوي البلوري ، ويشكل تكرار المستويات البلورية الموازية لبعضها بعضا ما يسمى الهيكل الشبكي في الفراغ ، حيث تعدد عقد هذا الهيكل أمكنة لتوضع الذرات ، وتقاس المسافة بين مراكز الذرات المتجاورة



شكل (١ - ٣)

بالأنفستروم ($1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$) .

وللمقارنة بين أنواع الهياكل الشبكية المختلفة نأخذ مجموعة محاور احداثية ثلاثية و نرسمها بحيث تنطبق على ثلاثة حروف ملتقية من حروف الهيكل الشبكي ثم نأخذ على هذه المحاور أطوالاً مساوية أطوال حروف الهيكل المنطبقة عليها ، فبتساوي زوايا ميل المحاور الثلاثية على بعضها بعضاً من جهة أو عدم تساويها وبتساوي الأطوال المأخوذة على هذه المحاور من جهة ثانية أو عدم تساويها يمكن أن نميز بين سبعة أنواع رئيسية من الهياكل الشبكية :

أ- المكعب (Cubic) — انظر الشكل (١ - ٣ I) .

وتتساوى فيه أطوال الحروف أي : $a = b = c$ وزواياه الثلاث متساوية وقائمة : $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

ب- الشكل الرباعي (Tetragonal) — انظر الشكل (١ - ٣ II) .
يختلف فيه الارتفاع عن البعدين الآخرين المتساويين وزواياه الثلاث قائمة، أي :

$$a = b \neq c ; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

ج- متوازي المستطيلات (Orthorhombic) — انظر الشكل (١ - ٣ III)
حروفه الثلاثة مختلفة إلا أن زواياه متساوية وقائمة أي :

$$a \neq b \neq c ; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

د- الموشور المعيني (Rhombohedral) — (انظر الشكل (١ - ٣ IV)
حروفه الثلاثة متساوية وزواياه الثلاث أيضاً متساوية غير أنها ليست قائمة أي :

$$a = b = c \quad ; \quad \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

هـ - أحادي الميل (Monoclinic) — انظر الشكل (١ - ٣ - V)

وفي هذا الشكل قد تتساوى الحروف الثلاثة وقد تختلف والاهم من ذلك أن زواياه الثلاث اثنتين منهما قائمتان والثالثة مختلفة عنهما أي :

$$a \neq b \neq c \quad ; \quad \alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$$

و - ثلاثي الميل (Triclinic) — انظر الشكل (١ - ٣ - VI)

في هذا الشكل أيضا قد تتساوى الحروف الثلاثة وقد تختلف غير أن زواياه الثلاث كلها متباينة ويميز على النحو التالي :

$$a \neq b \neq c \quad ; \quad \alpha \neq \beta \neq \gamma$$

ز - الموشور السداسي المنتظم (Hexagonal) — انظر الشكل (١ -

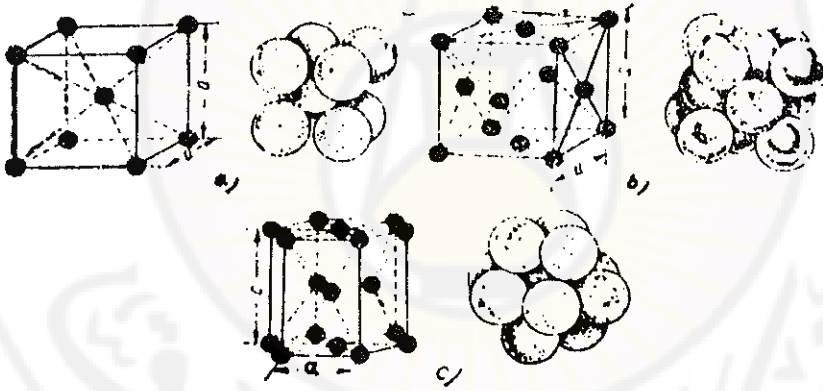
٣ - VII)

وهو الشكل الهندسي ذو القاعدة السداسية المنتظمة والذي تكون حروفه عمودية على مستوى القاعدة ويميز عادة بأربعة محاور بدلا من ثلاثة ، ثلاثة منها في مستوى أفقي (مستوى القاعدة) والرابع شاقولي أي عمودي على مستوى المحاور الثلاثة السابقة ويميز بالعلاقات التالية :

$$a_1 = a_2 = a_3 \neq c \quad ; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 120^\circ \quad ; \quad \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 90^\circ$$

إن المعادن والخلائط المعدنية تتبلور جميعها تقريبا حسب أحد ثلاثة أشكال رئيسية من بين السبعة السابقة وهي :

١- المكعب : وتتركز الذرات في هذا الهيكل بأحد ثلاثة أشكال ، إما أن تتوضع ثمان ذرات في رؤوس المكعب الثمانية ويسمى عندئذ الهيكل الشبكي البسيط حيث يكون توضع الذرات بهذا الشكل غير كثيف ، وإما أن تتوضع ذرة واحدة في المركز الحجمي للمكعب بالإضافة للذرات الثماني المتمركزة في رؤوسه ويسمى المكعب المتمركز حجياً (شكل ١ - ٤ - a) ، أو أن تتوضع ست ذرات في مراكز وجوه المكعب بالإضافة طبعا للذرات المتمركزة في رؤوسه ويسمى عندها المكعب المتمركز وجهياً (شكل ١ - ٤ - b) ، وأهم المعادن التي تتبلور بهذا الشكل هي : الحديد ، الألمنيوم ، النحاس ، الذهب ، النيكل ، الرصاص ، التيتانيوم ، التنغستين وغيرها .



شكل (١ - ٤)

٢- الرباعي : وهو الموشور الرباعي المنتظم كما رأينا قبل قليل والذي مقطعه الأفقي مربع ومقطعه الشاقولي مستطيل ويمكن أن يكون الرباعي بسيطاً أو متمركزاً حجياً أو متمركزاً وجهياً على غراء المكعب ، ومن المعادن التي تتبلور بالشكل الرباعي : القصدير ، الغاليوم ، الإنديوم .

٣ - الموشور السداسي المنتظم : وله شكل واحد حيث تتوضع الذرات على الرؤوس الستة لكل من القاعدتين وإضافة لذلك تتوضع ذرة واحدة في منتصف كل من القاعدتين وثلاث ذرات في المستوى النصف لارتفاع الهرم بحيث تشكل مثلثاً متساوي الاضلاع طول ضلعه يساوي طول حرف قاعدة الموشور (شكل ١ - ٤ c) ، وأهم المعادن التي تتشكل بلوراتها على هذا النحو : التوتياء والمنغنيوم والكاديوم وغيرها . إن الطريقة الصحيحة لرسم الهيكل الشبكي هي الطريقة المبينة على يسار الشكل (١ - ٤) - أي رسم الذرات في الهيكل الشبكي على شكل كرات متلامسة - ولكن هذا الرسم للهيكل الشبكي غير مريح ، لذا تستخدم في رسم الهيكل الشبكي الطريقة الشرطية وهي المبينة على اليمين في الشكل (١ - ٤) .

يحدد الهيكل الشبكي بعناصر هذا الهيكل أو أبعاده ، إذ يتحدد المكعب بعنصر وحيد هو طول ضلع المكعب a (انظر الشكل ١ - ٤) . وتكون قيم هذا الضلع من درجة أبعاد الذرات وتقاس بالأنغستروم . فمثلاً طول ضلع الهيكل الشبكي لمعدن الكروم والذي هو مكعب متمركز حجماً يساوي $2,878 \text{ \AA}$ ، وطول ضلع الهيكل الشبكي للالمنيوم والذي هو مكعب متمركز وجهياً يساوي $4,041 \text{ \AA}$. وفي الشكل الرباعي فإن الارتفاع c لا يساوي طول ضلع القاعدة a كما ذكرنا سابقاً وتختلف النسبة (c/a) من معدن لآخر . أما في الموشور السداسي المنتظم فاما أن تفس الذرات بعضها بعضاً (أي أن الذرات الثلاث التي تقع في داخل الموشور تفس الذرات التي تتوضع في القاعدتين) وعندها يسمى هذا الهيكل الموشور السداسي المنتظم الكثيف بالذرات وتكون النسبة (c/a) مساوية 1,633 (انظر الشكل ١ - ٤) . أما إذا كانت النسبة (c/a) أكبر من ذلك فإن الموشور غير كثيف بالذرات .

إضافة إلى الشكل الهندسي للهيكل الشبكية وأطوال اضلاعها والنسبة بين هذه الاضلاع فإن هناك عددا من العوامل لابد من أخذها بعين الاعتبار لما لها من الأهمية على الخواص الفيزيائية والميكانيكية لهذه الهياكل وبالتالي للبلورات المعدنية وأهم هذه العوامل :

أ - رقم الإحداثيات •

ب - عدد ذرات الهيكل الشبكي الواحد •

ج - نسبة ملء الفراغ •

د - مقاييس أكبر فراغ في الهيكل الشبكي •

هـ - المستوي والاتجاه الأكثر كثافة بالذرات •

٢ - رقم الإحداثيات : هو الرقم الذي نحصل عليه فيما لو اخترنا إحدى ذرات الهيكل الشبكي وأحصينا عدد الذرات المجاورة لها مباشرة وبما أن الذرات المتجاورة هي أيضاً متلامسة فيما بينها فانه يمكن تعريف رقم الاحداثيات بأنه عدد الذرات التي تلامس ذرة واحدة في الهيكل الشبكي الواحد وبالتالي البلورة الواحدة كلها متماثلة أي أن رقم الاحداثيات هذا هو الرقم نفسه لأي ذرة من ذرات الهيكل الشبكي أو البلورة الواحدة • وهكذا فإن رقم الاحداثيات مثلاً لذرة من ذرات المكعب البسيط هو 6 وللمكعب المتمركز حجباً 8 وللمكعب المتمركز وجهياً 12 وللموشور السداسي المنتظم كثيف الذرات 12 وللموشور السداسي المنتظم غير الكثيف هو 6 (أي عندما : $c/a \neq 1,633$) •

ب - عدد ذرات الهيكل الشبكي الواحد : نستطيع حساب عدد الذرات التابعة لهيكل شبكي واحد بالاستعانة بالاشكال الفراغية السابقة وإذا أخذنا بعين الاعتبار أن الذرة الواحدة قد تكون تابعة لأكثر من هيكل شبكي واحد أي

مشتركة بين عدة هياكل شبكية متجاورة وذلك حسب مكان وقوعها في الهيكل الشبكي لذا فالتا نميز في هذا الصدد الحالات التالية :

• الذرة الواقعة في مركز الهيكل الشبكي تتبع بكاملها لهذا الهيكل

الذرة الواقعة في منتصف أحد وجوه الهيكل هي مشتركة بين هيكليين متجاورين أي أن نصفها فقط يتبع الهيكل الشبكي المعني •

الذرة الواقعة على أحد رؤوس الهيكل الشبكي تكون تابعة لثمانية هياكل شبكية متجاورة إذا كان الهيكل رباعياً أو مكعباً ولستة هياكل إذا كان الهيكل موشوراً سداسياً • فلو حسبنا على سبيل المثال عدد الذرات التابعة لهيكل شبكي واحد من النوع المكعب المتمركز وجهياً نرى أن في هذا الهيكل ثمانية ذرات متمركزة في رؤوس القاعدة وكل منها مشترك بين ثمانية هياكل أي ثمنها فقط تابع للهيكل الواحد • ثم هناك ست ذرات متمركزة في منتصفات الوجوه الستة وكل منها مشترك بين هيكليين متجاورين أي نصفها فقط تابع لهذا الهيكل فيصبح مجموع ذرات الهيكل الواحد :

$$8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$$

في حين أنه لو حسبنا عدد ذرات المكعب المتمركز حجمياً لوجدنا أنهما اثنتان فقط :

$$8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$$

ج - نسبة ملء الفراغ : ويقصد بها النسبة بين الحجم الذي تحتله الذرات من الهيكل الشبكي والحجم الكلي لهذا الهيكل أي V_a / V حيث V_a حجم

الذرات في الهيكل الشبكي الذي حجمه V وتحسب هذه النسبة بعد حساب عدد الذرات التابعة للهيكل الشبكي الواحد ومن خلال عد الذرات كرات متلامسة أي أن كل ذرة تلامس أقرب جاراتها ، وبدلالة مقياس الهيكل الشبكي وقطر الذرة d أو نصف قطرها r وبلاستعانة بالشكل الهندسي للهيكل الشبكي . ولنحسب على سبيل المثال نسبة ملء الفراغ في المكعب المتمركز حيميا ، فعدد الذرات التابعة لهذا الهيكل هو اثنتان فقط وتلامس الذرات فيه هو على النحو المبين في الشكل (١ - ٥) أي أن قطر المكعب يساوي ضعف قطر الذرة (شكل ١ - ٥ b) ، فإذا افترضنا أن طول ضلع المكعب مقدار معلوم a نستطيع أن نحسب قطر الذرة أو نصف قطرها .

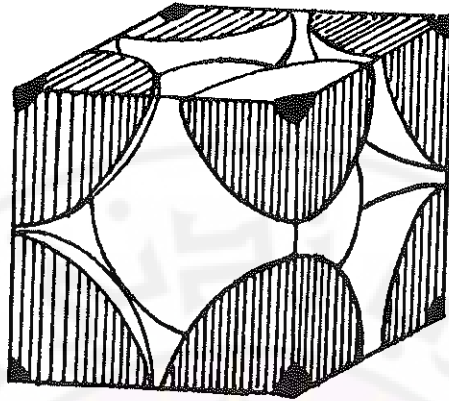
$$d = 2r = \frac{\sqrt{3}}{2} a$$

وحجم الذرات التابعة للهيكل الشبكي :

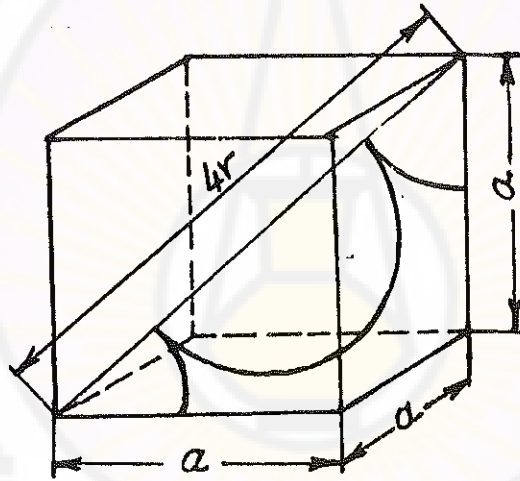
$$\begin{aligned} V_a &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} a \right)^3 \frac{\pi}{6} + 8 \cdot \frac{1}{8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} a \right)^3 \frac{\pi}{6} = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{8} \pi a^3 = 0,68 a^3 \end{aligned}$$

بما أن الحجم الكلي للهيكل الشبكي هو a^3 فتكون نسبة ملء الفراغ في هذا الهيكل هي :

$$\frac{V_a}{V} = \frac{0,68 a^3}{a^3} = 0,68$$



(a)



(b)

شكل (١ - ٥)

نستطيع بالطريقة نفسها أن نوجد العلاقة بين قطر الذرة أو نصف قطرها وطول ضلع الهيكل الشبكي في المكعب المتمركز وجهياً :

$$d = 2r = \frac{\sqrt{2}}{2} a$$

لذا يكون حجم الذرات التابعة لهذا الهيكل :

$$V_a = 4 \left(\frac{\sqrt{2}}{2} a \right)^3 \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{6} a^3 = 0,74 a^3$$

وتكون نسبة ملء الفراغ في هذا الهيكل :

$$\frac{V_a}{V} = \frac{0,74 a^3}{a^3} = 0,74$$

د - مقاييس أكبر فراغ في الهيكل الشبكي : إن لرقم الاحداثيات ونسبة ملء الفراغ علاقة ببعضهما بعضا أي أن كبر رقم الاحداثيات يؤدي إلى كبر نسبة ملء الفراغ غير أن هذا لا يؤدي بالضرورة إلى نقص في مقاييس الفراغات الموجودة في الهيكل الشبكي التي قد تنقص أو قد تزيد وذلك تبعاً لعدد هذه الفراغات وكيفية توزيعها . ونذكر على سبيل المثال أن أكبر فراغ في الهيكل الشبكي للمكعب المتمركز حجباً يقع مركزه عند النقطة ذات الاحداثيات : $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ ، صفر (على افتراض مركز الاحداثيات يقع في أحد رؤوس الهيكل الشبكي). وفي هذا الفراغ يمكن وضع كرة قطرها يساوي $0,252 a$ وبالمقابل نجد أنه في الفراغ الكائن في الهيكل الشبكي للمكعب المتمركز حجباً والواقع مركزه عند النقطة $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ ، صفر ، صفر يمكن وضع كرة قطرها $0,293 a$ في حين أن نسبة ملء الفراغ هنا هي $0,74$ أي أكبر منها في المكعب المتمركز حجباً .

هـ - المستوي والاتجاه الأكثر كثافة بالذرات : نحصل على المستوي أو الاتجاه الأكثر كثافة بمقارنة المستويات المختلفة للهيكل الشبكي والاتجاهات المختلفة فيه وذلك بعد أن تتبع مع كلٍّ من هذه المستويات والاتجاهات طريقة مماثلة لتلك التي اتبعناها من أجل حساب نسبة ملء الفراغ فيكون المستوي الأكثر كثافة هو المستوي الذي تحتل فيه الذرات أكبر نسبة من المساحة ، أما الاتجاه الأكثر كثافة فهو الاتجاه الذي تمس الذرات بعضها بعضاً بيموجه . ولكي نستطيع تمييز مستو

أو اتجاه ما لابد لنا من معرفة كيفية تحديد هوية المستويات والاتجاهات في الهيكل الشبكي أو البلورة بصورة عامة وبشكل واضح ومحدد .

ولكن قبل أن نبين كيف يتم تحديد هذه المستويات والاتجاهات الأكثر كثافة بالذرات نتعرف على الطريقة المتبعة بصفة عامة لتحديد العقد (الرؤوس) والحروف والاتجاهات والمستويات في الهيكل الشبكي .

لقد ذكرنا آنفاً أن مجموعة محاور الاحداثيات التي نختارها يمكن أن تكون أحياناً غير متعامدة وذكرنا أيضاً أن هناك ستة معايير تميز الهيكل الشبكي وهي : a, b, c و α, β, γ . فبغض النظر عن علاقة هذه المعايير بعضها ببعض أي :

$$a \neq b \neq c ; \quad \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$

فإن الطريقة التي سوف تتبعها لتحديد عنصر ما في الهيكل الشبكي (عقدة ، حرف ، اتجاه ، مستو) لا تتعلق بتعامد مجموعة المحاور الاحداثية أو عدم تعامدها وبتساوي أطوال أضلاع الهيكل الشبكي أو عدم تساويها .

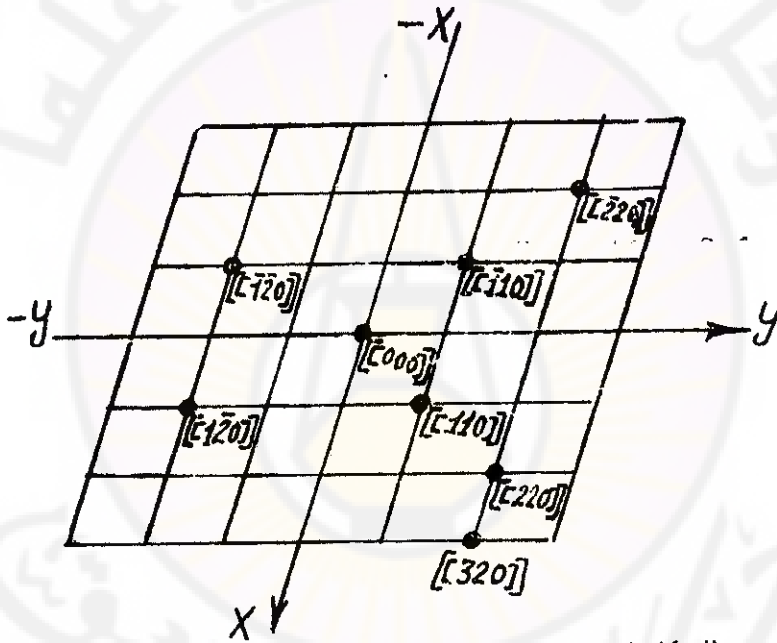
١- **اشارات العقد :** ونقصد بالعقد نقاط توضع الذرات في الهياكل الشبكية فإذا عدنا إحدى عقد الهيكل الشبكي مركزاً للاحداثيات فإن أي عقدة أخرى تحدد بالعلاقة التالية :

$$R = ma + nb + pc$$

حيث : p, n, m ثلاثة أرقام . وتدعى هذه الأرقام بإشارات العقدة . وتوضع هذه الأرقام الثلاثة ضمن قوسين مربعين مزدوجين على الشكل التالي :

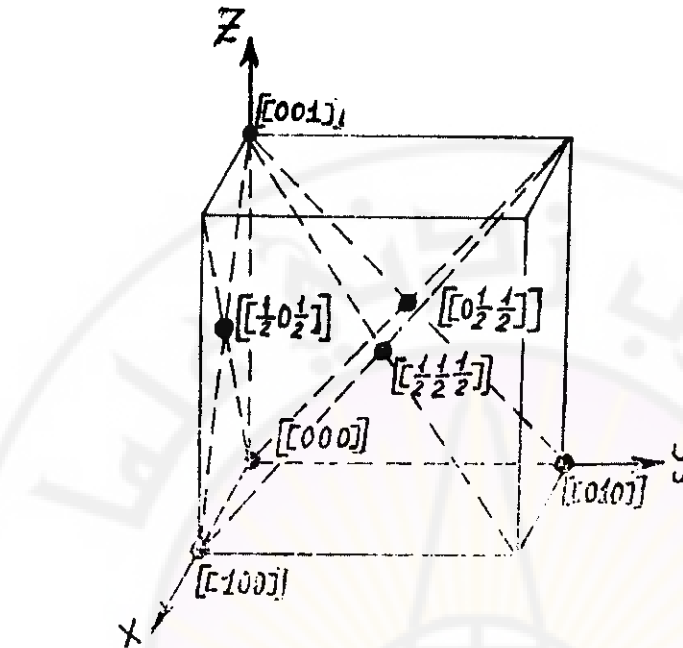
• [[m n p]] •

وتكتب هذه الأرقام دون أي إشارات فاصلة بينها وتقرأ بالتالي من اليسار إلى اليمين . وعندما يكون أحد هذه الأرقام سالباً يوضع فوقه خط أفقي . فمثلاً $[\bar{0}23]$ نقرأ على الشكل التالي وهو : (صفر ، ناقص اثنان ، ثلاثة) . يبين الشكل (١ - ٦) إشارات بعض العقد في شبكة مستوية مائلة الزوايا (حيث الإشارات على المحور z تساوي الصفر) . كما يبين الشكل (١ - ٧) إشارات العقد (الرؤوس) ومراكز الوجوه والمركز لهيكل شبكي إذا



الشكل (١ - ٦) : إشارات بعض العقد في شبكة مستوية مائلة

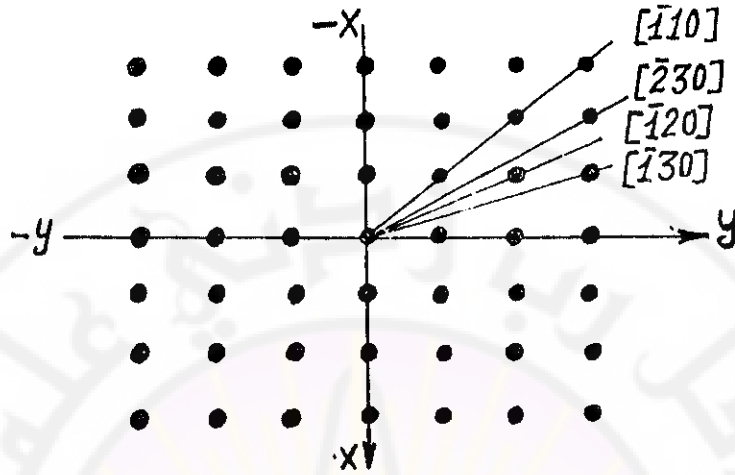
عددنا أحد رؤوسه مركزاً للأحداثيات . ويجب أن تنوه هنا إلى أن الأرقام الكسرية توجد مكاناً فقط في إشارات العقد . وأما في إشارات الاتجاهات والمستويات فتستخدم الأرقام الصحيحة فقط .



الشكل (١ - ٧) : إشارات بعض العقد في مكعب متمركز حيمياً

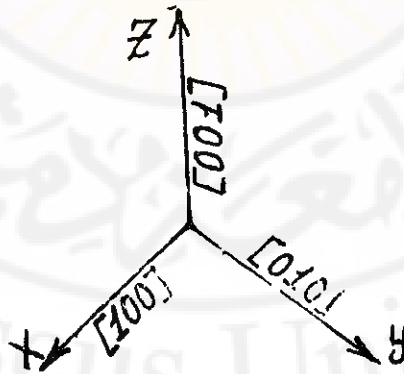
٢- إشارات الصفوف (الحروف) : إن الصف أو المستقيم المار بعقدة أو مجموعة عقد وكذلك الحرف في أي هيكل شبكي تحدد جميعها بزوايا ميلها بالنسبة لمحاور الاحداثيات . فإذا كان الصف لا يمر من نقطة تقاطع محاور الاحداثيات فإنه يمكننا أن نتصور أنه يتحرك موازياً لنفسه حتى يمر من نقطة التقاطع هذه . ولهذا التصور ما يبرره ذلك لأن جميع الاتجاهات المتوازية في الهيكل الشبكي متماثلة . عند ذلك يُحدد اتجاه الصف بنقطتين : نقطة تقاطع محاور الاحداثيات وأي من عقد الصف الذي نختاره . وتعتمد في هذه الحالة إشارة العقدة (الرأس) هي إشارة الصف نفسها وتكتب داخل قوسين مربعين $[mnp]$. وكما نلاحظ فإن هذه الإشارة تميز مجموعة صفوف متوازية أو مجموعة حروف متوازية أيضاً في الهيكل الشبكي .

يُبيّن الشكل (١ - ٨) بعض الصفوف في شبكة مستوية ($z = 0$) وكما



الشكل (١ - ٨) : اشارات بعض الصفوف في شبكة مستوية

نلاحظ من الشكل فان الصف الذي نعبر عنه بالاشارة $[110]$ يمكن أن نعبر عنه ايضا بالاشارات التالية : $[220]$ و $[330]$... الخ . ولكن لتحديد إشارة صف ما يؤخذ عادة أقرب عقدة الى نقطة تقاطع محاور الاحداثيات . تكون اشارات محاور الاحداثيات في هذه الحالة على الشكل التالي : $0x - [100]$ ، $0y - [010]$ ، $0z - [001]$ وهذا واضح في الشكل (١ - ٩) وهنا



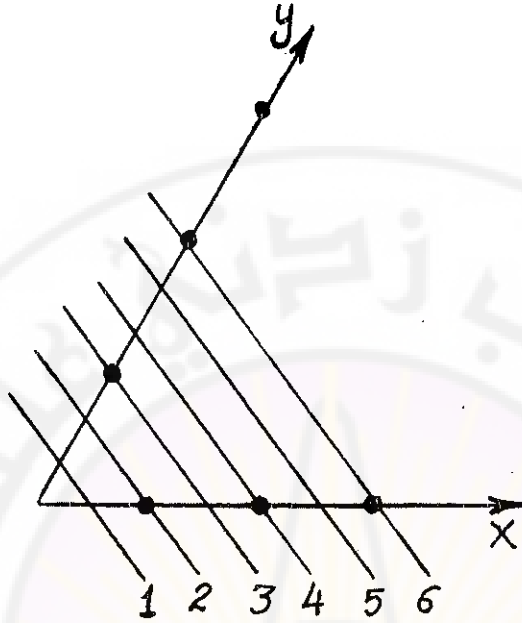
الشكل (١ - ٩) : اشارات محاور الاحداثيات

واحدة من المزايا الرئيسة للإشارات البلورية وهي أن إشارات محاور الاحداثيات لا تتعلق بالزوايا المحصورة بين هذه المحاور فهي متماثلة لأي مجموعة كانت من محاور الاحداثيات •

٣- إشارات المستويات (الوجوه) : تُحدد الشبكات المستوية في الهيكل الشبكي وما يماثلها من وجوه هذا الهيكل بزوايا ميلها على مجموعة محاور الاحداثيات • إن أي وجه للهيكل الشبكي يوازي شبكة مستوية ما وبالتالي عدداً لانهائياً من الشبكات المستوية التي توازي في الوقت نفسه هذه الشبكة • لنفرض أن مستوي ما لهيكل شبكي يتقاطع مع محاور الاحداثيات الثلاثة حسب الأطوال التالية : $ma \cdot nb \cdot pc$ ، فإن النسبة $m:n:p$ تحدد ميل هذا المستوي على محاور الاحداثيات • وتحدد بهذا الشكل كل المستويات الموازية لهذا المستوي •

يبين الشكل (١ - ١٠) مجموعة مستويات متوازية فيما بينها وتوازي المحور z وتبعد هذه المستويات عن بعضها بعضاً بمسافات متساوية • يمكننا أن نكتب إحداثيات كل مستوي من هذه المستويات وإشاراته على الشكل التالي :

رقم المستوي	الأطوال التي يتقاطع فيها المستوي مع مجموعة المحاور			$m:n:p$
	x	y	z	
1	$a/2$	$b/3$	∞	$1/2 : 1/3 : \infty = 3 : 2 : \infty$
2	a	$2 b/3$	∞	$1 : 2/3 : \infty = 3 : 2 : \infty$
3	$3 a/2$	b	∞	$3/2 : 1 : \infty = 3 : 2 : \infty$
4	$2 a$	$4 b/3$	∞	$2 : 4/3 : \infty = 3 : 2 : \infty$



الشكل (١ - ١) : مجموعة مستويات متوازية فيما بينها وتوازي المحور z

يمكن عد سلسلة نسب الأرقام $m:n:p$ لكل المستويات المتوازية هي نسب لأرقام صحيحة $p:q:r$. وتسمى هذه الأخيرة عوامل بَيَس . ويمكننا من الجدول السابق كتابة النسب على الشكل التالي :

$$1/2 : 1/3 : \infty \quad 1 : 2/3 : \infty = 3/2 : 1 : \infty = 2 : 4/3 : \infty = \dots =$$

$$p : q : r = 3 : 2 : \infty.$$

ولكن لتيسير مستوى ما أو اتجاه في هيكل شبكي لا نستخدم هذه العوامل وإنما نستخدم ما يسمى إشارات ميللر . وإشارات ميللر هي مقلوب عوامل بَيَس وبعد تحويلها إلى أرقام صحيحة . لذا تكون إشارات ميللر :

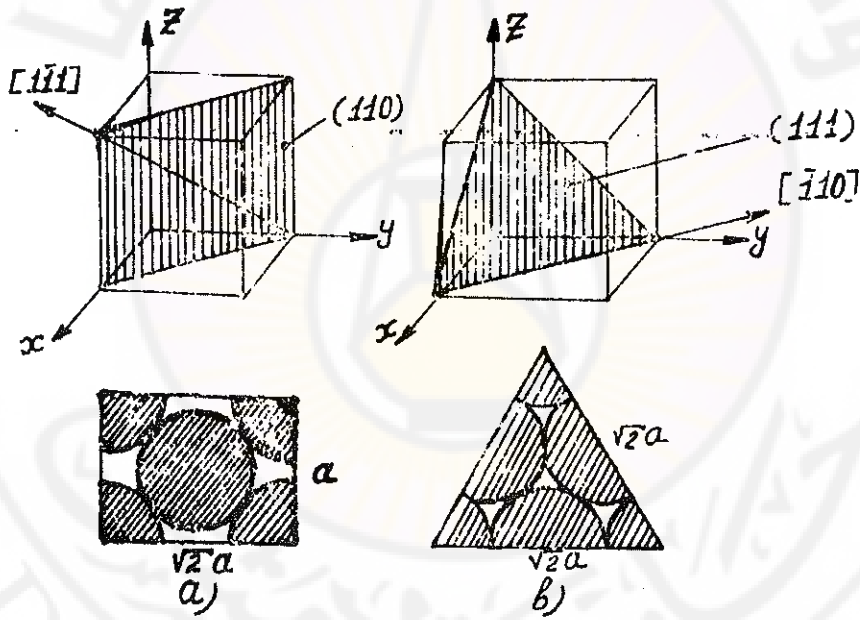
$$\frac{1}{p} : \frac{1}{q} : \frac{1}{r} = h : k : l$$

فمثلاً تكون إشارات ميلر للمستويات المبينة في المثال السابق (شكل ١ - ١٠).

$$h:k:l = 2:3:0$$

لهذا تسمى الأرقام h و k و l إشارات ميلر وتوضع في أقواس دائرية بدون أي إشارات فاصلة بينها وتقرأ بالتالي من اليسار إلى اليمين . وعندما يكون أحد هذه الأرقام سالباً يوضع فوق هذا الرقم خط أفقي قصير .

ويبين الشكل (١ - ١١) إشارات ميلر للمستويات والاتجاهات الأكثر كثافة بالذرات في المكعب المتمركز حجبياً والمكعب المتمركز وجهياً .



الشكل (١ - ١١) : المستويات والاتجاهات الأكثر كثافة بالذرات في كل من المكعب المتمركز حجبياً والمكعب المتمركز وجهياً .

أما في الموشور السداسي فإن الأمر يختلف عنه في المكعبات والسبب في ذلك

يعود إلى أنه عند استخدام الاحداثيات الثلاثية فإن :

$$(u = 120^\circ, \beta = \gamma = 90^\circ, a = b \neq c)$$

وهذا واضح على الشكل (١ - ١٢) الذي يبين مرسمات وجوه الموشور والتي تكون موازية للمحور z (حيث المحور z عمودي على مستوى الرسم) . فعند استخدام الاحداثيات الثلاثية نلاحظ أن الوجوه المتماثلة لهذا الموشور تشغل مواقع مختلفة بالنسبة لمحاور الاحداثيات الافقية إذ تكون الوجوه AF, BC, CD, EF موازية لأحد المحورين وتتقاطع مع المحور الآخر بينما يتقاطع الوجوه AB و DE مع كلا المحورين . وبما أن نقاط تقاطع هذه الوجوه مع المحاور الافقية X, Y تبعد مسافات متساوية عن المركز وتساوي كل مسافة a فإن إشارات ميلر للوجوه AF, BC, CD, EF هي :

$$h:k:l = \frac{1}{a} : \frac{1}{\infty} : \frac{1}{\infty} = 1:0:0 \quad \text{أو} \quad (100)$$

وأما إشارات الوجهين AB, DE فهي :

$$h:k:l = \frac{1}{a} : \frac{1}{-a} : \frac{1}{\infty} = 1:\bar{1}:0$$

أو $(1\bar{1}0)$ للوجه (AB, DE) للوجه DE .

من هنا نلاحظ أن الوجوه المتماثلة للشكل نفسه (الموشور) تكتب

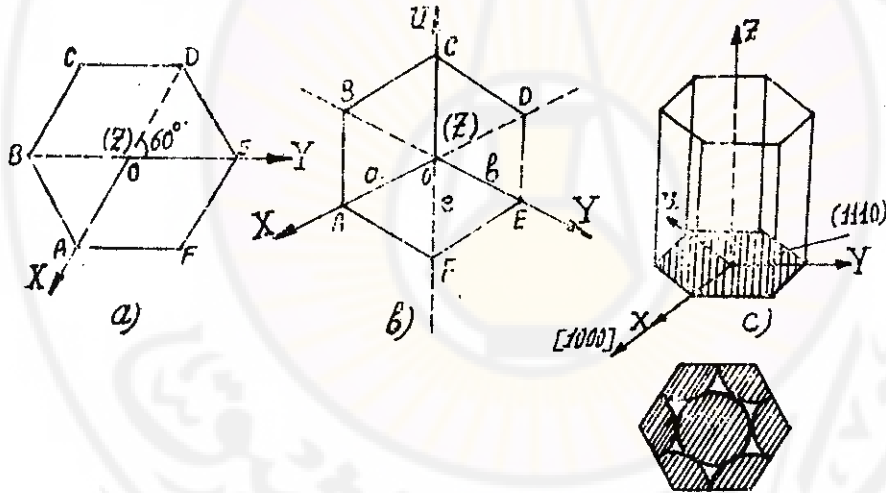
بإشارات مختلفة ، وللتخلص من هذا الإشكال يمكن استخدام محور إحداثيات رابع وليكن u والذي يشكل زوايا متساوية (وتساوي 120°) مع كل من المحورين X, Y ويكون هذا المحور عموديا على المحور z . لهذا ولكتابة إشارات ميلر لهذه الوجوه في مجموعة المحاور الاحداثية الرباعية تستخدم أربعة عناصر هي : a, b, c, e حيث :

$$a = b = c \neq d$$

وتضاف في هذه الحالة إلى إشارات المستوي أو الاتجاه الإشارة الرابعة المناسبة . . .
المعينة من العلاقة :

$$h:k:l = \frac{1}{a} : \frac{1}{b} : \frac{1}{c} : \frac{1}{d}$$

وهكذا فإن كلاً من الوجوه المتماثلة آتية الذكر في المنشور السداسي تتقاطع مع محاور الأحداثيات الرباعية في خطين يختلفان فيما بينهما بالتسمية والإشارة (انظر الشكل ١ - ١٢) ، فمثلاً يكون الوجه AB موازياً للمحور u



الشكل (١ - ١٢) : إشارات ميللر لوجوه مختلفة في المنشور السداسي المنتظم .

ويتقاطع مع المحور X في الخط AO ومع المحور Y في الخط CB والذي يساوي AO ، ولهذا تكون إشارات الوجه AB هي :

$$h:k:l = \frac{1}{a} : \frac{1}{-a} : \frac{1}{\infty} : \frac{1}{\infty} = 1:\bar{1}:0:0$$

أو ($\bar{1}100$) .

أما إشارات الوجوه الأخرى فهي :

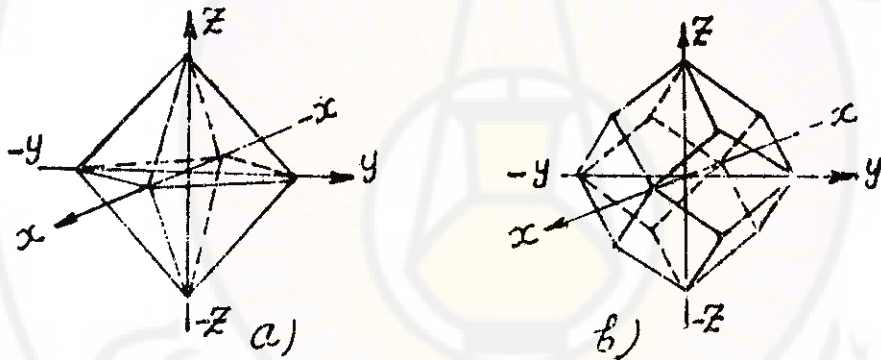
$$AF (10\bar{1}0) \cdot BC (0\bar{1}10) \cdot CD (\bar{1}010) \cdot DE (\bar{1}100)$$

$$EF (01\bar{1}0)$$

وتكون إشارات ميلر في هذه الحالة للمستوي والاتجاه الأكثر كثافة بالذرات هي

التي يبينها الشكل (١ - ١٢) .

هناك مستويات متشابهة ويمكن أن يحل أي منها محل الآخر فيما لو غيرنا الوضع النسبي بين الهيكل الشبكي ومجموعة محاور الاحداثيات . وتتميز هذه



الشكل (١ - ١٣) : مستويات متماثلة في الهيكل الشبكي.

المستويات بأن تؤخذ إشارات أحدها فقط وتوضع ضمن قوسين مركبتين . فمثلا

الإشارة { 111 } تعني كل المستويات الميئة في الشكل (١ - ١٣ a) وهي :

$$(111) \cdot (\bar{1}\bar{1}1) \cdot (1\bar{1}\bar{1}) \cdot (\bar{1}1\bar{1}) \cdot (\bar{1}\bar{1}\bar{1}) \cdot (11\bar{1}) \cdot (\bar{1}\bar{1}1) \cdot (111)$$

وتعني الإشارة { 110 } كل المستويات الميئة في الشكل (١ - ١٣ b) وهي :

$$(110) + (101) + (011) + (\bar{1}\bar{1}0) + (\bar{1}\bar{1}0) + (\bar{1}01) + (10\bar{1}) + (01\bar{1}) + (0\bar{1}1)$$

ويشار إلى الاتجاهات المتماثلة بأن توضع إشارات إحداها فقط ضمن قوسين مثلثين،
فمثلاً $\langle 121 \rangle$. تعني كل الاتجاهات التالية :

$$[121] + [112] + [2\bar{1}\bar{1}] + [2\bar{1}1] + [\bar{1}2\bar{1}] + \dots \text{ الخ .}$$

* * *

الفصل الثاني

البنية الحقيقية للبلورات المعدنية وعيوب الهياكل البلورية

٢ - ١ . البنية الحقيقية للبلورات المعدنية :

لقد تعرفنا في الفصل السابق على البنية المثالية للبلورات المعدنية وافترضنا أنه في الحالة المثالية تكون الذرات متوضعة في عقدها المخصصة لها في الهيكل الشبكي بشكل منتظم وصحيح بينما تشكل مجموعة الهياكل الشبكية هذه ما يُسمى البلورة المعدنية المثالية . وبناءً على معرفة التركيب الذري والبنية البلورية للسعادن أمكن تفسير الكثير من خواص هذه المعادن الفيزيائية والميكانيكية . غير أن هناك العديد من هذه الخواص لم تكن قابلة للتفسير إلا بعد أن افترض أن هناك أخطاء أو عيوباً في تركيب الهياكل الشبكية للبلورات وعدم انتظام في توزيع الذرات على تلك الهياكل .

وقد قُسمت خواص المعادن من هذه الناحية الى مجموعتين : المجموعة الأولى - وتشمل الخواص التي لا تتأثر بالبنية وبالعيوب الناجمة عن عدم انتظام الهياكل الشبكية ، ومن هذه الخواص : الناقلية للحرارة والكهرباء ، الحرارة النوعية ، عامل التمدد الحراري ، عامل المرونة ... الخ والمجموعة الثانية - وتشمل الخواص التي تتأثر تأثراً كبيراً بعيوب الهياكل الشبكية ، وكل الخواص الميكانيكية تقع تقريباً ضمن هذه المجموعة .

ولتفسير ما يُسمى البنية الحقيقية للبلورات المعدنية نستطيع أن نتصور أن

أبعاد البلورات المعدنية تكون عادة غير كبيرة نسبياً (تتراوح أبعادها بين 10^{-1} و 10^{-4} سم) ، لذلك فإن القطعة المعدنية تتألف من عدد كبير جداً من البلورات وتسمى عندها البنية المتعددة البلورات (بولي كريستالين) ولا تستطيع البلورات في هذه البنية أن تأخذ أشكالاً هندسية منتظمة كما هو الحال في البلورات المترسبة في المحاليل الملحية وذلك لأسباب عدة ستعرض لها فيما بعد (الفصل الرابع من هذا الكتاب) .

يكون اتجاه الهيكل الشبكي داخل البلورة كينياً ، إذ هناك عدة احتمالات لكيفية توضع الهيكل الشبكي الواحد ، ومع هذا فإن اتجاه الهيكل الشبكي يمكن أن يتغير ، فعند معاملة المعادن على البارد (بالدرفلة أو بالسحب) فإن الانفعالات اللدنة يمكن أن تسبب اتجاهاً مشتركاً للبلورات وبالتالي اتجاهاً مشتركاً للهيكل الشبكية المشكلة لهذه البلورات .

ويجب أن نتوه هنا إلى أن الحصول على قطعة معدنية مؤلفة من بلورة أحادية (مونو كريستال) يتم عندما يكون تبريد هذه القطعة بطيئاً جداً ، هذا بالإضافة إلى استخدام عمليات أخرى مساعدة وخاصة لهذا الغرض . وتحضر البلورات الأحادية عادةً لاستخدامها في بعض فروع التقنية الخاصة (لصناعة أنصاف النواقل مثلاً) أو لإجراء بعض الأبحاث العلمية الخاصة عليهما .

لقد أثبتت الأبحاث أن هناك فرقاً كبيراً بين البنية الحقيقية والمثالية للبلورات المعدنية ، وهذا الفرق (كما ذكرنا آنفاً) ناجم عن وجود بعض العيوب في البنية الحقيقية للبلورات ، لهذا لا بد من التعرف على العيوب التي تحصل في البنية البلورية للمعادن أو بتعبير آخر التعرف على البنية الحقيقية للبلورات المعدنية .

٢ - ٢ - عيوب الهياكل الشبكية :

تصنف عيوب الهياكل الشبكية حسب طبيعة انتشارها في ثلاثة أنواع :

- ١ - عيوب نقطية الشكل •
- ٢ - عيوب خطية الشكل •
- ٣ - عيوب سطحية الشكل •

إن هذه العيوب غالباً ما تكون ذات أبعاد ثلاثة وتمتد لتحتل حجوماً معينة، ولكن يبقى لهذا التصنيف ما يبرره ، إذ أن امتداد هذه العيوب لا يكون متساوياً في الاتجاهات كافة وسوف نتعرف فيما يلي بشيء من التفصيل على الأنواع الثلاثة هذه لعيوب الهياكل الشبكية •

٢ - ٢ - ١ - العيوب النقطية :

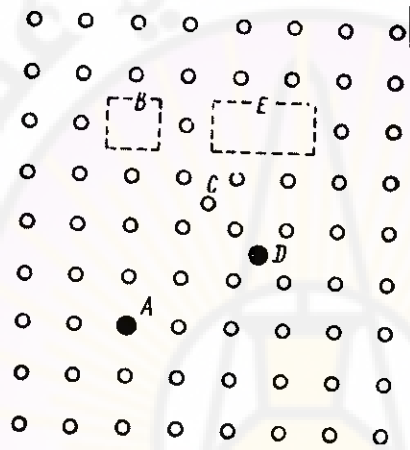
العيوب النقطية هو خرق في البنية البلورية • وتكون أبعاد هذا العيب ، ووفق جميع الاتجاهات في الفراغ ، من مرتبة مسافة واحدة أو عدد محدد من المسافات بين الذرات • ويمكن أن يكون للعيوب النقطية شكل بسيط أو معقد وذلك حسب ظروف تشكله ، وسوف نبحت في الأشكال البسيطة للعيوب النقطية فقط وهي :

أ - الثقوب : وتعني وجود أمكنة فارغة في عقد الهيكل الشبكي لم تحتلها الذرات •

ب - الذرات التداخلية : وهي ذرات متوضعة في أماكن غير نظامية بين عقد الهيكل الشبكي • ويسكن أن تكون هذه الذرات أساسية (أي من العناصر الأساسية نفسه) أو أن تكون غريبة •

ج - الذرات التبادلية : وهي ذرات غريبة تحل محل ذرات العنصر الأساسي في عقد الهيكل الشبكي والتي غالباً ما تكون مختلفة في حجمها عن ذرات هذا العنصر .

ويبين الشكل (٢ - ١) النماذج الأساسية لعيوب النقطية في الهياكل الشبكية .



- A - ذرة تبادلية .
- B - ثقب .
- C - ذرة تداخلية أساسية .
- D - ذرة تداخلية غريبة .
- E - ثقب مزدوج .

الشكل (٢ - ١) : الأشكال الأساسية للعيوب النقطية في الهيكل الشبكي

تحدث العيوب النقطية آفة الذكر إما أثناء تشكل البلورة المعدنية (أي أثناء عملية التلور) أو بسبب وقوع البلورة المعدنية تحت تأثير انفعالات لدنة (أي معاملة المعدن بالدرفلة أو بالسحب) أو بسبب انثار الذرات (حين توافر الظروف المناسبة للانتشار) أو نتيجة لتأثير إشعاعات نووية في البلورة المعدنية .

تكون الطاقة اللازمة لتشكيل ثقب واحد هي من مرتبة الإلكترون فولط .

فمثلاً ليتم تشكل ثقب في بلورة معدن الجرمانيوم يلزم تفكيك الروابط الأربعة في الهرم الثلاثي المحيط بالذرة بحيث يلزم لفك كل ارتباط من هذه الروابط ١ إلكترون فولط ، وهذا يعني أن الطاقة اللازمة لتشكيل ثقب واحد في بلورة الجرمانيوم تساوي ٢ إلكترونات فولطاً ، بينما تساوي الطاقة اللازمة لتشكيل ثقب في بلورة السيليسيوم ٢٣ إلكترونات فولطاً وهكذا .

يمكن أن تتحد الثقوب مع بعضها لتشكيل ثقباً ثنائياً أو ثلاثياً أو أن تشكل ثقباً على شكل هرم ثلاثي . وإذا تجمع عدد كبير من الثقوب (أي حزمة ثقوب) فانه يتشكل لدينا فجوة أو عدة فجوات . ويمكن للذرات التداخلية الموجودة بين عقد الهياكل الشبكية أن تشكل فيما بينها حبلاً من هذه الذرات أو أن تشكل خطاً منحنيّاً أو أن تتحد على شكل صفيحة ذرية . وكل هذه العيوب تكون أقل استقراراً من العيب النقطي الأحادي ذلك لأنه يلزم لتشكيلها طاقة أكبر بكثير من الطاقة اللازمة لتشكيل العيب النقطي . فمثلاً يلزم لتشكيل العيوب المختلفة في بلورة النحاس وعند درجة حرارة الغرفة الطاقة التالية :

لتشكل ثقب أحادي $\sim 0.9 \div 1.0$ إلكترونات فولطاً

للذرة التداخلية بين عقد الهيكل 2.4 إلكترونات فولطاً

لحبل من الذرات التداخلية وفق الاتجاه $< 100 > 2.7 \div 2.8$ إلكترونات فولطاً

لحبل من الذرات التداخلية وفق الاتجاه $< 111 > 4.1$ إلكترونات فولطاً

وتُصرف الطاقة آتفة الذكر ليس فقط على تفكيك الروابط وإنما تُصرف أيضاً على تشويه الهيكل الشبكي في المكان المحيط بالعيوب المتشكل وذلك بسبب إزاحة الذرات عن وضعها الاستقراري .

يسكن أن تتحرك العيوب النقطية عبر البلورة ويمكن أن تتحد مع بعضها بعضاً ومع عيوب أخرى ويمكن أن يلتقي بعضها مع بعضها الآخر .

تتواجد الثقوب والذرات التداخلية والتبادلية في بلورات أي بنية وعند أي درجة حرارة ممكنة • فلقد أمكن البرهان على أن كل هيكل شبكي يحتوي على عدد من الثقوب • وبازدياد عدد الثقوب في الهيكل تزداد الطاقة المخزنة في المجموعة وتزداد في الوقت نفسه الانتروبيا حيث تتعلق الانتروبيا بعدد احتمالات توزيع الذرات في الهياكل الشبكية ، فلو فرضنا أنه في هيكل ما أن عدد الأماكن الكلية التي يمكن للذرات أن تحتلها N والفراغة منها n فيكون عدد الاحتمالات W مساوياً :

$$W = \frac{N!}{(N-n)!n!} \quad (2.1)$$

والإنتروبيا هي تابع للرقم W حسب علاقة بولتسمان :

$$S = k \cdot \ln W \quad (2.2)$$

يكون تركيز الثقوب (أي نسبة عدد الأماكن الفارغة الى الأماكن الكلية في الهيكل) مساوياً الصفر عند درجة حرارة الصفر المطلق ، ويزداد هذا التركيز بسرعة عند ارتفاع درجة الحرارة ، ويتعلق هذا التركيز بدرجة الحرارة T حسب العلاقة التالية :

$$\frac{n}{N} \cong e^{-E/kT} \quad (2.3)$$

- حيث : N - العدد الكلي للذرات في واحدة الحجم من البلورة •
 n - عدد الثقوب في ذلك الحجم •
 E - القدرة النشطة للثقب والتي تساوي العمل اللازم لتشكيل هذا الثقب •
 k - ثابت بولتسمان •

وبين الجدول التالي كيف يزداد تركيز الثوب بارتفاع درجة حرارة بلورة من معدن النحاس :

درجة الحرارة الطاقة	0	100	300	500	700	900	1100	1350
تركيز الثوب $\frac{n}{N}$	0	10^{-57}	10^{-19}	10^{-11}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}

وهذا يعني أنه عندما تكون درجة حرارة بلورة النحاس $(T \approx 1100^\circ K)$ فإن نسبة تركيز العيوب $\frac{n}{N} \sim 10^{-5}$ ، أي أنه لكل ١٠ عقدة يوجد ثقب واحد وتكون المسافة الوسطية بين الثوب الاحادية مساوية عددا من المسافات الذرية .

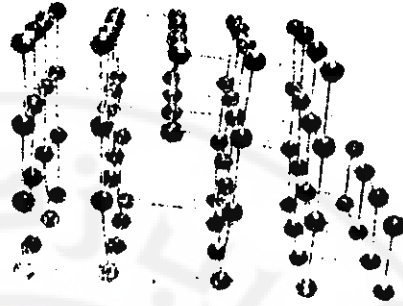
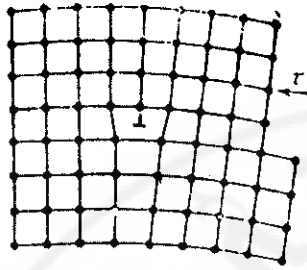
٢ - ٢ - ٢ العيوب الخطية الشكل :

العيوب الخطية - هو خرق في نظام البنية البلورية على طول خطٍ ليس بالضرورة أن يكون مستقيماً . ولا تتعدى أبعاد المقطع العرضي لهذا العيب مسافة ذرية أو بضع مسافات ذرية أما طوله فيمكن أن يساوي طول البلورة المعدنية .

يُنسب الى العيوب الخطية غير المستقرة في البلورة تلك السلاسل من العيوب النقطية كالثقب أو الذرات الدخيلة المتواجدة بين العقد ، وهذه العيوب لا يمكن أن تستمر طويلاً . أما العيوب المستقرة والثابتة في البلورة فهي الانخلاعات - وهي انحرافات خطية مثل انقطاع المستويات الذرية أو انزلاقها .

الانخلاعات الخطية والحازونية - المزايا الأساسية للانخلاعات :

يمكننا أن نتصور الانخلاع الخطي على أنه حرف لمستوى ذري غير كامل (انظر الشكل ٢ - ٢) . ويبيّن الشكل (٢ - ٣) أن حرف المستوي المتصور داخل الهيكل الشبكي يتشكل اذا حركنا من الاعلى نصف مستويين مستويين بلورة مثالية أو اذا قطعنا نصف مستوي ذري من الاسفل . ويجب أن نلاحظ أن

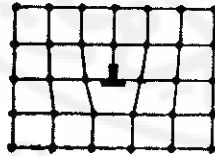


الشكل (٢ - ٢) : نموذج للانخلاع الخطي الشكل (٢ - ٣) : مخطط الانخلاع الخطي

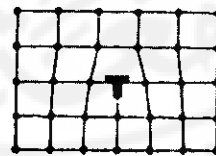
الشكل (٢ - ٢) يبيّن فقط شبكة ذرية واحدة ومخرج الانخلاع على هذه الشبكة ، بينما يجب أن تتصور أن البلورة طولاً معيناً وهذا الانخلاع هو خط يخرج من مستوي الرسم • وبشكل أبسط يمكن أن تتصور أن البلورة التي تحتوي على انخلاع خطي كالكتاب الذي تكون إحدى أوراقه قد بتر نصفها •

يسمى نصف المستوي هذا المستوي الزائد أو المستوي الإضافي • وكما نلاحظ من الشكلين السابقين فإن وجود هذا المستوي الإضافي سوف يحدث تشوهاً في المستويات المجاورة له مباشرة وسوف يقل مقدار هذا التشوه كلما ابتعدنا عن المستوي المذكور •

تقسم الانخلاعات الخطية الى موجبة وسالبة • فالانخلاع الخطي الموجب (شكل ٢ - ٤ a) يطابق تلك الحالة عندما يكون المستوي الإضافي من



a)

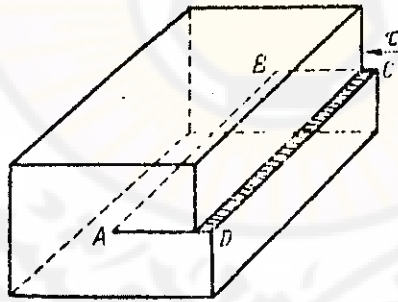


b)

الشكل (٢ - ٤) : انخلاع خطي موجب (a) وانخلاع خطي سالب (b) •

الاعلى ، وطبقاً لذلك فإن الاجهادات المؤثرة في النصف العلوي من البلورة هي اجهادات ضغط وفي النصف السفلي اجهادات شد . أما الانخلاع الخطي السالب (شكل ٢ - ٤) فيطبق تلك الحالة عندما يكون النصف العلوي من البلورة واقعاً تحت تأثير إجهادات شد والنصف السفلي واقعاً تحت تأثير إجهادات ضغط . ونلاحظ على الشكل (٢ - ٤) كيف يُرمز عادةً للانخلاعين السالب والموجب . وليس من الصعب هنا ملاحظة أنه يمكن الحصول على أحد الانخلاعين من الآخر وذلك بإدارته بزاوية ١٨٠ درجة . لهذا فليس هناك من معنى للتوقف على إشارة الانخلاع إذا كان هذا الانخلاع وحيداً في البلورة ، بينما يكون للإشارة معنى إذا تواجد انخلاع آخر بجانبه فالانخلاعات التي لها الإشارة نفسها تتدافع بينما تتجاذب الانخلاعات المختلفة الإشارة .

يُبيّن الشكل (٢ - ٥) بلورة تقع تحت تأثير إجهاد انزلاق (قص) حيث يسبب هذا الاجهاد انفعالات لدنة مما يؤدي الى أن النصف العلوي ينزلق على مستوي الانزلاق ABCD وذلك بالنسبة للنصف السفلي . فإذا قارنا بين

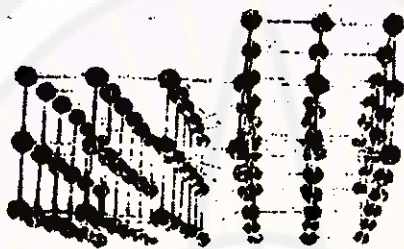


الشكل (٢ - ٥) : الانخلاع الخطي الناتج عن تأثير إجهاد قص على البلورة المعدنية .

الشكلين (٢ - ٤) و (٢ - ٥) فإنه يمكن أن نرى أن حد الانزلاق AB والذي يفصل بين القسم المنزلق والقسم الثابت من البلورة هو الانخلاع الخطي الذي نتحدث عنه .

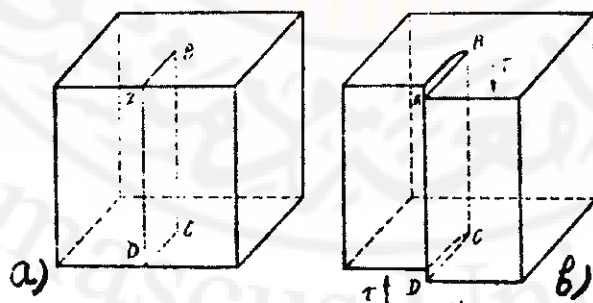
أما الانخلاع الحلزوني (انظر الشكل ٢ - ٦) فهو انزلاق أحد جزئي البلورة بالنسبة للآخر . ويمكننا أن نتصور الانخلاع الحلزوني على الشكل التالي :

إذا أحدث شق في البلورة المعدنية (انظر الشكل ٢ - ٧ a) وتم بعد ذلك انزلاق وعلى طول مستوي الشق (الشكل ٢ - ٧ b) فإن الخط BC الذي يفصل بين الجزء المتحرك والجزء الثابت هو خط الانخلاع الحلزوني .



الشكل (٢ - ٦) : نموذج للانخلاع الحلزوني .

لا تتألف البلورة التي تحتوي على انخلاع حلزوني من مستويات ذرية متوازية ، وإنما تبدو هذه البلورة وكأنها مؤلفة من مستو ذري واحد لث على شكل لولب حلزوني . ويعد محور هذا اللولب BC هو خط الانخلاع الحلزوني . ويجب أن نعلم أنه في حالة الانخلاع الحلزوني ، وكسنا في حالة الانخلاع

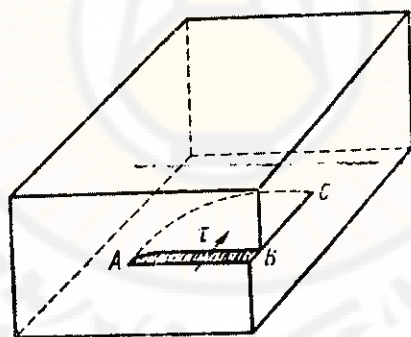


الشكل (٢ - ٧) : الانخلاع الحلزوني الناتج عن تأثير إجهاد قص على البلورة المعدنية

الخطي ، يكون تشوه الهيكل الشبكي متركزا قرب خط الانخلاع في منطقة ضيقة لا يتعدى قطرها بضع مسافات ذرية .

تكون الانخلاعات الحلزونية إما يمينية أو يسارية ويلعب اتجاه الدوران في هذه الحالة الدور نفسه الذي تلعبه الإشارة عند الانخلاعات الخطية فالانخلاعات الحلزونية اليمينية أو اليساريان يتدافعان فيما بينهما أما الانخلاعات اليمينية واليساري فإنهما يتجاذبان .

من هذا كله نستنتج أن الانخلاع الخطي والانخلاع الحلزوني هما حدود فاصلة بين الجزء المنزلق والجزء الثابت للبلورة المعدنية . ويجب أن نعلم أن حقل الانزلاق في البلورة الحقيقية ، وفي أغلب الأحيان ، يكون محددًا بحدود أكثر تعقيدًا من تلك التي وضعناها . إذ غالبًا ما يكون الانخلاع مختلطًا - أي خطيًا وحلزونيًا في الوقت نفسه - وعندها يكون خط الانخلاع هو المنحني AC كما في الشكل (٢ - ٨) .

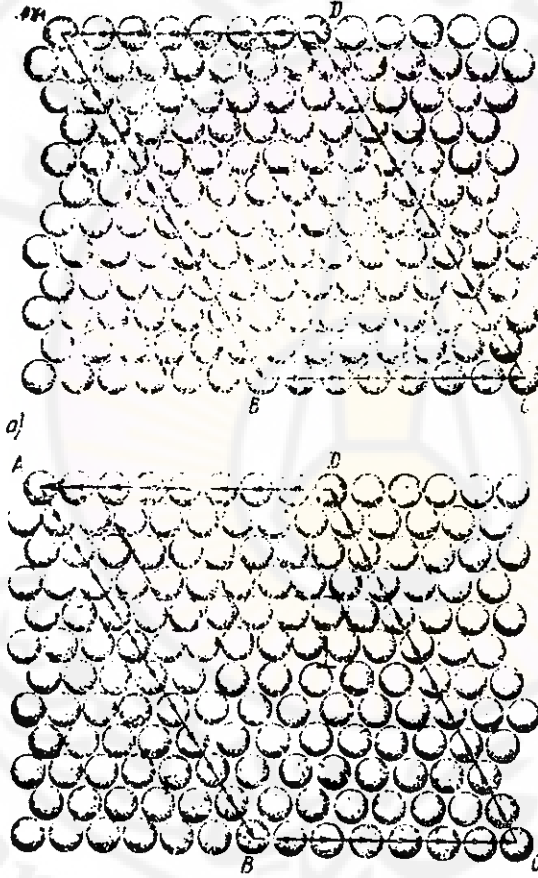


الشكل (٢ - ٨) : انخلاع مختلط (خطي وحلزوني) ناتج عن تأثير إجهاد قص على البلورة المعدنية .

تحديد نوع الانخلاع بواسطة شعاع بورغرز :

لتمييز الانخلاعات وتحديدتها من حيث الحجم والاتجاه تتبع الطريقة المسماة

طريقة بورغرز ، حيث يُختار أحد المستويات الذرية وفي هذا المستوي تؤخذ إحدى الذرات ويرسم بدءاً منها مضلع مغلق بحيث تكون أضلاع هذا المضلع موازية لحروف الهياكل الشبكية وبحيث يكون عدد المسافات الذرية المأخوذة من الأعلى إلى الأسفل مساوياً عددها من الأسفل إلى الأعلى ومن اليسار إلى اليمين مساوياً ما يؤخذ من اليسار إلى اليمين ، فإذا كان هذا المستوي خالياً من



الشكل (٢ - ٩) : مضلع بورغرز في المستويات الذرية .

(a) مضلع بورغرز في مستوي ذري مثالي .

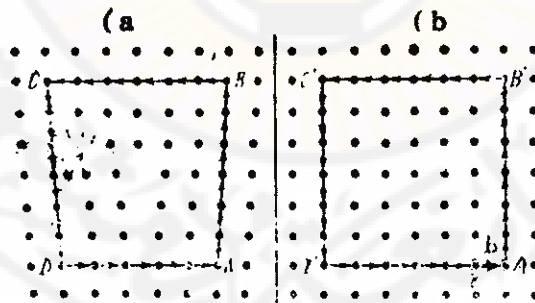
(b) مضلع بورغرز في نفس المستوي الذري ولكن بعد أن أحدث فيه انخلاع خطي .

الانخلاعات فإن المضلع المرسوم يصبح مغلقاً أي أننا سوف نمود إلى نقطة البدء، أما إذا احتوى المستوي على انخلاع ما فإن إغلاق المضلع يحتاج إلى شعاع $\vec{b}$ يُسمى شعاع بورغرز : ويوضح الشكل (٢ - ٩) هذه الطريقة ، إذ رسمنا في المستوي الذري المبين في الشكل (٢ - ٩ a) مضلع بورغرز المغلق - أي الذي لا يحتوي بداخله على انخلاع ، ثم رسمنا في المستوي الذري نفسه ولكن بعد أن احتوى بداخله على انخلاع خطي المضلع السابق نفسه (انظر الشكل ٢ - ٩ b) ، وأخذنا نقطة البدء في كلتا الحالتين النقطة A ، كما أخذنا الاضلاع مساوية بالمسافات الذرية ما يلي :

$$AB = 11 \quad ; \quad BC = 7 \quad ; \quad CD = 11 \quad ; \quad DA = 7$$

فاننا نلاحظ أن المضلع السفلي لن يكون مغلقاً ويحتاج إلى شعاع بورغرز لإغلاقه . وكما نلاحظ فإن شعاع بورغرز يساوي في هذه الحالة مسافة ذرية واحدة .

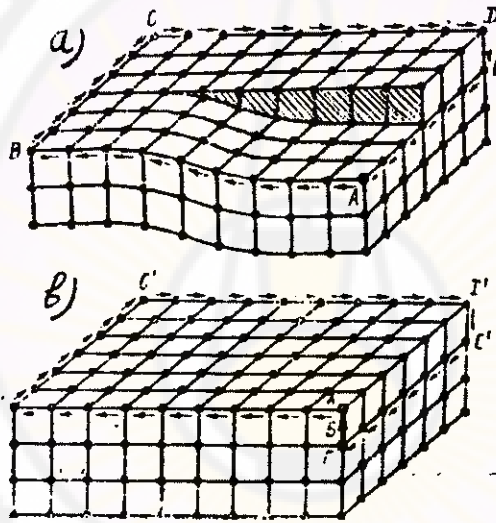
ونستطيع من هذا التوضيح أن نعطي تعريفاً لشعاع بورغرز على أنه : مقياس للانحرافات التي تحدث في جزء من البلورة بسبب وجود الانخلاعات في هذا الجزء .



الشكل (٢ - ١٠) : مضلع بورغرز للانخلاع الخطي .
مضلع بورغرز المغلق في مستوي ذري يحتوي على انخلاع .
مضلع بورغرز المفتوح في مستوي ذري مثالي .

ويجب أن ننوه هنا إلى أن طريقة بورغرز هذه تسمح لنا بأن نرسم المضلع المغلق في مستوي ذري يحتوي على انخلاع ، وعندها فإن المضلع المفتوح والذي يحتاج إلى شعاع بورغرز لإغلاقه سوف يكون في المستوي الذري التالي - أي المستوي الذي لا يحتوي على انخلاع - انظر الشكل (٢ - ١٠ b) •

يبين الشكل (٢ - ١١) مضلع بورغرز في المستوي الذي يحتوي على انخلاع حلزوني • ونلاحظ هنا أن شعاع بورغرز يساوي خطوة اللولب ويتجه باتجاه محور الانخلاع ، أما في حالة الانخلاع الخطي فإن شعاع



الشكل (٢ - ١١) : مضلع بورغرز للانخلاع الحلزوني •
 (a) مضلع بورغرز المغلق في مستوي ذري يحتوي على انخلاع •
 (b) مضلع بورغرز المفتوح في مستوي ذري مثالي •

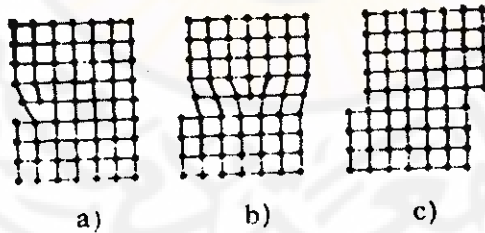
بورغرز يساوي مسافة ذرية واحدة (أي المسافة بين مستويين ذريين) ويتجه باتجاه الانزلاق •

يسمح لنا شعاع بورغرز بتفسير الفرق بين الانخلاعات وبعض العيوب الخطية الأخرى مثل سلاسل الثقوب أو سلاسل الذرات الدخيلة • فمضلع بورغرز

المرسوم في مستوي ذري يحتوي على سلسلة خطية من عيوب نقطية لا يختلف عن مضلع بورغر في المستوى الذري نفسه ولكن دون أن تحوي هذه السلسلة من العيوب النقطية ، وسوف يكون شعاع بورغر في هذه الحالة مساويا للصفر . أما في الانخلاعات فان شعاع بورغر لا يساوي الصفر .

تحرك الانخلاعات :

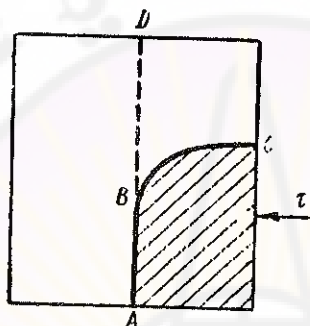
إن الميزة الأساسية للانخلاعات هي حركتها عبر البلورة المعدنية فيما إذا تعرضت هذه الانخلاعات لتأثير قوى خارجية . ولنفرض أن انزلاقاً ما حدث في البلورة المعدنية وأن حدود حقل الانزلاق انخلاع خطي (انظر الشكل ٢ - ١٢ a) . فحتى يتحرك هذا الانخلاع على مستوي انزلاقه ومسافة ذرية واحدة لا يلزم فك الارتباط في جميع المستويات الذرية التي تتقاطع مع مستوي الانزلاق وإنما يكفي فك الارتباط وفق المستوي الذري المجاور وعندها سوف يتحرك الانخلاع نحو اليمين ومسافة ذرية واحدة (انظر الشكل ٢ - ١٢ b) . وبهذا الشكل ينتقل المستوي الإضافي بكامله مع حافته التي تشكل الانخلاع الخطي إلى اليمين مسافة ذرية واحدة . وإذا استمر تحرك الانخلاع وانزلاقه حتى نهاية البلورة فانه يفنى إلا أنه يترك في البلورة انزلاقاً مساوياً لشعاع بورغر (انظر الشكل ٢ - ١٢ c) .



الشكل (٢ - ١٢) : تحرك الانخلاع الخطي عبر البلورة المعدنية

إن الانخلاع يمتد عادة في البلورة من السطح إلى السطح أو يتجزأ إلى انخلاعات أخرى أو يشكل داخل البلورة خطأ مغلقاً ولكن لا يمكن أن ينتهي انخلاع

ما داخل البلورة • وخط الانخلاع ليس بالضرورة خطا مستقيما بل يمكن أن يأخذ أي شكل كما نلاحظ من الشكل (٢ - ١٣) • فعلى هذا الشكل يمكن أن نفرض أن الخط AEC هو حد لحقل الانزلاق - أي h وانخلاع خطي - فن الواضح أن الانزلاق لا يمكن أن ينتهي داخل البلورة فيما أن يستمر خط الانخلاع على طول البلورة كاملاً (أي حتى النقطة D) أو أن يكون الانزلاق معزولا



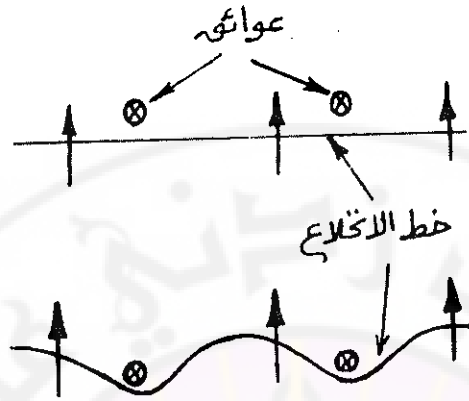
الشكل (٢ - ١٣) : انخلاع مختلط داخل البلورة المعدنية •

وعندها يكون حقل الانزلاق محددا بالخط BC - أي أن هذا الانخلاع هو انخلاع حلزوني • وفي هذه الحالة العامة يكون الخط ABC هو انخلاع مختلط مؤلف من انخلاعين أحدهما خطي والآخر حلزوني واندماج خطا الانخلاعين في منحنٍ واحد • ولكن يبقى شعاع بورغرز ثابتا على طول منحني الانخلاع •

رأينا فيما سبق أنه نتيجة لتأثير قوى القص تنتقل الانخلاعات على امتداد مستويات انزلاقها • وفي هذه الاثناء تسر عبر أخطاء وتشوهات أخرى في الهياكل

المشبكة وهذه التشوهات قد تشكل عوائق تبطئ حركة الانخلاعات وتصلبها

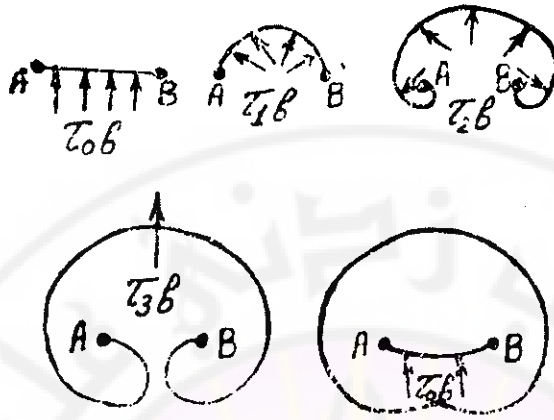
غير أن تأثير هذه العوائق لا يكون عادة في طول خط الانخلاع بل غالبا ما يقتصر على إعاقة بعض نقاط هذا الخط وإذا كانت القوة المطبقة أو بالاحرى الاجهاد كبيراً فإن خط الانخلاع ينحني من بين هذه العوائق ويتابع سيره كما في الشكل (٣ - ١٤) • ولهذه الظاهرة أثرها الكبير في قابلية المعادن للتشكيل اللدن حيث



الشكل (٢١ - ١٤) : تأثير العوائق على حركة الانخلاعات .

أنه عندما يبدأ الانسياب في المعدن فإن الانخلاعات الموجودة في البنية تبدأ بالتحرك وعندما تصادف ما يعيقها وينحني خط الانحلال بين نقاط الإعاقة فإن الانحلال يتابع تقدمه بالاتجاه العمودي على خط الانحلال كما في الشكل (٢ - ١٥) أي أنه في النهاية سوف يتشكل من كل خطٍ واصل بين نقطتي إعاقة خط انحلال مغلق وخط مستقيم جديد ولا يلبث بتأثير الاجهاد أن يكرر هذه العملية باستمرار ليكون مثابة منبع لتوايد الانخلاعات وتسمى هذه الظاهرة منبع فرانك ريد .

ولهذا فإن عدد الانخلاعات في البنية يزداد بتأثير التشكيل اللدن للمعدن .
وفعلًا ثبت من الناحية العملية أنه عند تشكيل المعادن على البارد تزداد قساوتها، وأول ما يتبادر إلى الذهن عندئذ أن هذه القساوة قد تكون ناجمة عن فناء بعض الانخلاعات في البنية ، غير أن دراسات البنية أثبتت عكس ذلك حيث تبين أن كثافة الانخلاعات في البنية المشكلة على البارد ترتفع لتبلغ $10^{10} - 10^{12}$ سم^٢/سم^٢، بينما تبلغ كثافة الانخلاعات في المعادن المطراة أو المسكوبة نحو 10^8 سم^٢/سم^٢ .

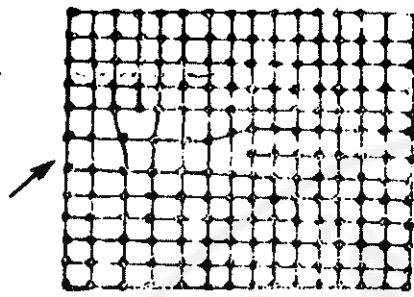


الشكل (٢١ - ١٥) : منع فرائك ريد .

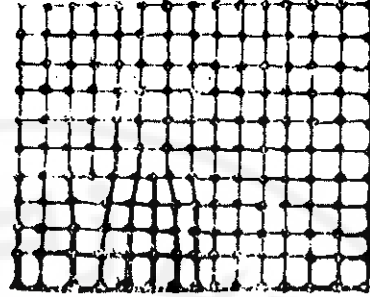
تأثير الانخلاعات في بعضها بعضاً :

إن تحرك انخلاع ما في مستوى الانزلاق بتأثير قوى القص سوف يؤثر في الانخلاعات الأخرى الموجودة في البلورة بل أنه سيفسح المجال أمام الانخلاعات للتأثير في بعضها بعضاً حيث أنه يتشكل جو من الاجهاد المرن حول الانخلاع المتحرك فان ذلك سيساعد على توليد قوى جذب بين الانخلاعات المتوازية والمختلفة في الإشارة وقوى دفع بين الانخلاعات المتوازية والمتفقة في الإشارة وهكذا فان الانخلاعات المتوازية المختلفة في الإشارة والتي تشترك في مستوى انزلاق واحد يمكن أن تقضي بعضها بعضاً إذ أنه من مستويين إضافيين أحدهما تحت مستوى الانزلاق والآخر فوق مستوى الانزلاق (انظر الشكل ٢ - ١٦) يمكن أن يتشكل مستو طبيعي واحد . أما الانخلاعات المتفقة في الإشارة فانها تستمر في دفعها لبعضها بعضاً في مستوى الانزلاق حتى نهاية البلورة .

إن الانخلاعات موجودة في البلورة بالاتجاهات كافة وليست بالضرورة متوازية أو شاقولية المستويات الإضافية كما أن القوى المؤثرة ليست دائماً عمودية

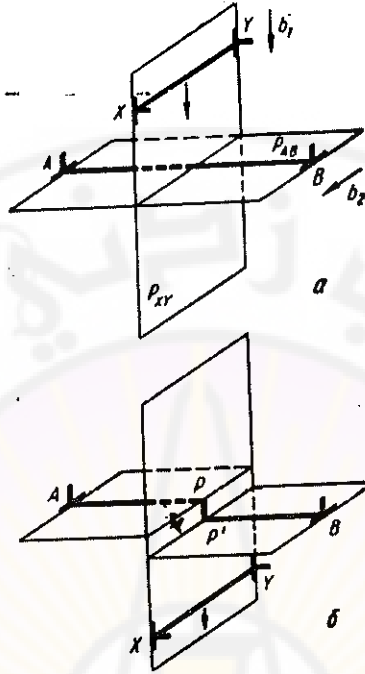


الشكل (٢ - ١٧) : القوة
مائلة على خطوط الانخلاعات.



الشكل (٢ - ١٦) : انخلاعات خطيان مختلفان
الاشارة ولهما مستوي انزلاق واحد.

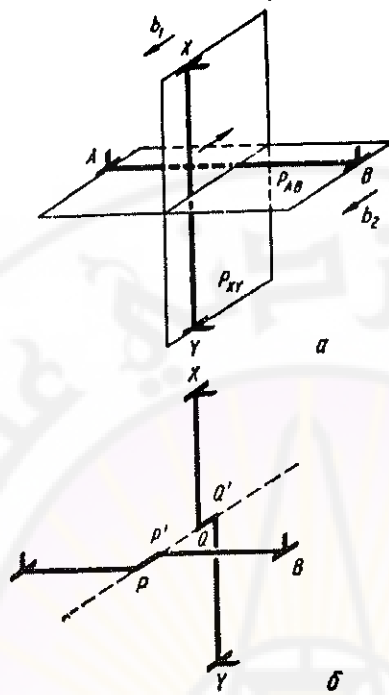
على خط الانخلاع بل يمكن أن تكون مائلة بحيث أن مركبتي القوة يمكن أن
تؤثرا في الانخلاعات المتعامدة مع بعضها بعضا (شكل ٢ - ١٧) وتحركها معا .
ويمكن للانخلاعات أن تتحرك في مستويات الانزلاق المتقاطعة ، ويؤدي هذا
إلى تقاطع الانخلاعات مما يسبب ظهور انكسارات (أو عتبات) على خطوط هذه
الانخلاعات . ونورد فيما يلي بعض الامثلة على تقاطع الانخلاعات الخطية .
فالشكل (٢ - ١٨) يبين تقاطع انخلاعين خطيين حيث شعاعا بورغرز لهذين
الانخلاعين متعامدان ، أما الشكل (٢ - ١٩) فيبين تقاطع انخلاعين خطيين أيضا
ولكن شعاعي بورغرز لهذين الانخلاعين متوازيان . نلاحظ أن هناك إختلافا
واضحا بين العتبة pp' في الشكل (٢ - ١٨) والعتبتين qq' و rr' في الشكل
(٢ - ١٩) . فالعتبة الاولى تكون عمودية على مستوي انزلاق الانخلاع الذي
تشكلت فيه ولقد انشطر مستوي الانزلاق هذا الى مستويين متوازيين ، وعندما
يصبح اتجاه القوة أو الاجهاد ملائما لتحرك هذا الانخلاع فإن العتبة pp' قد
لا تتحرك معه الامر الذي يجعل من هذه العتبة من جهة عقبة أمام تحرك الانخلاعات
التي سوف تعترض طريق انزلاقها وان تجاوزها لها يحتاج الى المزيد من الاجهاد



الشكل (٢ - ١٨) : تقاطع انخلاعين خطيين بحيث يكون شعاعا بورغرز لهما متعامدين
 (a) - شكل الانخلاعين قبل التقاطع .
 (b) - شكل الانخلاعين بعد التقاطع .

• PP' - عتبة تشكلت على خط الانخلاع AB .

ومن جهة أخرى سوف تصبح هذه العتبة مثابة منبع فرانك ريد لتكوين انخلاعات جديدة ، وبازدياد عدد الانخلاعات المتحركة وفق هذا النموذج تزداد عدد العتبات التي تزيد من مقاومة المعدن للانزلاق ، ولهذا السبب فكلما ازداد مقدار التشكيل اللدن في معدن ما ازدادت قساوته ، والاستمرار في التشكيل يتطلب زيادة الاجهاد المطبق . أما العتبتان اللتان تشكلتا في الشكل (٢ - ١٩) فانهما تقعان في مستويات انزلاق الانخلاعات التي تشكلت منها هذه العتبات وعندما تتحرك هذه الانخلاعات فان العتبات المشكلة سوف تزول وبالتالي لن تشكل أي عتبة أمام تحرك هذه الانخلاعات .



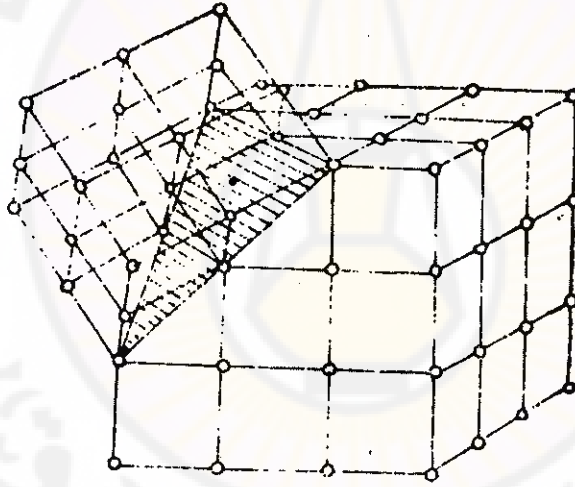
الشكل (٢ - ١٩) : تقاطع انخلاعين خطيين بحيث يكون شعاعا يورغرز لهما متوازيين
 (a) - شكل الانخلاعين قبل التقاطع .
 (b) - شكل الانخلاعين بعد التقاطع .
 PP' و QQ' - عتبتان تشكلتا في مستويات انزلاق هذين الانخلاعين .

٢ - ٢ - ٣ - العيوب السطحية :

يقال عن العيوب البلورية أنها سطحية إذا كان أحد أبعاد هذه العيوب الثلاثة متناهياً في الصغر بينما يتناسب البعدان الآخران مع أبعاد البلورة المعدنية .
 إذا فالعيوب السطحية هي العيوب ذات البعدين والتي تشكل مستويا أو بالاحرى سطحا بين البلورات أو بين أجزاء البلورات ، وتنقسم أنواع هذه السطوح وطبقاً لأسباب تشكلها إلى الأنواع التالية :

آ - المستويات ذات التوضع الخاطئ : وتحصل مثل هذه المستويات أثناء عملية التبلور عندما يكون توضع ذرات أحد المستويات توضعاً خاطئاً أي بحيث يكون المستوي منحرفاً إلى أحد الاتجاهات بمقدار مسافة ذرية واحدة .

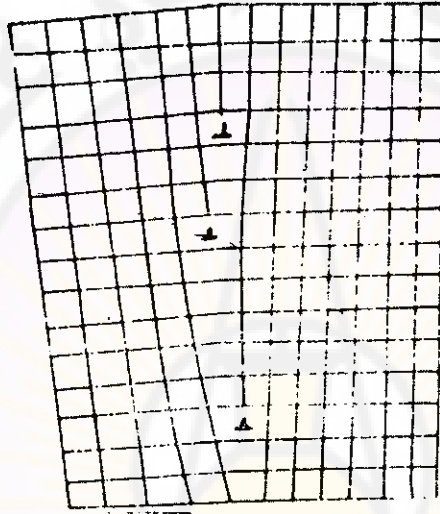
ب - حدود البلورات التوأمية : وتحدث مثل هذه العيوب عند التشكيل اللدن للسعدن عندما ينقلب أحد أجزاء البلورة عند أحد المستويات البلورية لتصبح الهياكل الشبكية في الجزء المنقلب منظرية للهياكل الشبكية الباقية في الجانب الآخر من مستوي التناظر والذي يُسمى مستوي التوأمة (انظر الشكل ٢ - ٢٠) .



الشكل (٢ - ٢٠) : حدود البلورات التوأمية

ج - حدود الأطوار المتشكلة : وتحدث عندما يبدأ أحد الأطوار بالتحويل إلى طور آخر فعندما يبدأ التحويل في إحدى البلورات تكون قد أصبحت مكونة من جزئين أحدهما من الطور الجديد والآخر من الطور السابق ويفصل بين هذين الجزئين سطح مشترك تكون ذراته تابعة لكل من الطورين بأن واحد .

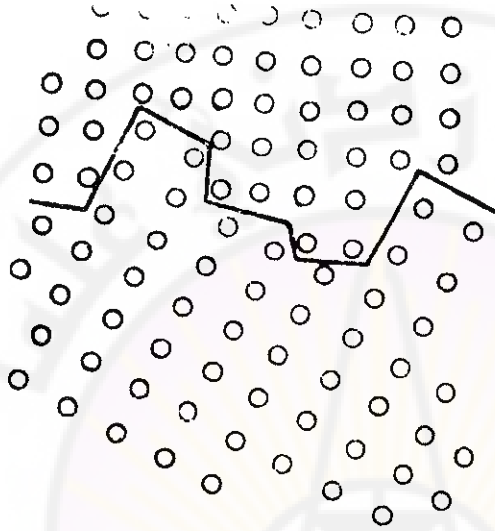
د - حدود البلورات الاضافية : إذا وجد في بلورة ما عدد من الانخلاعات الخطية المتوازية والمتساوية في الاشارة وكانت هذه الانخلاعات متقاربة (انظر الشكل ٢ - ٢١) فانها تجعل جزئي البلورة يميلان على بعضهما بعضا بزاوية ما وتشكل نهاية المستويات الاضافية للانخلاعات ما يشبه السطح الفاصل بين جزئي البلورة .



الشكل (٢ - ٢١) : حدود البلورات الاضافية .

هـ - حدود البلورات : إن بنية حدود البلورات لاتزال غير معروفة بشكل كامل وكان الاعتقاد السائد أن هناك طبقة أمورفية رقيقة من الذرات غير المتبلورة تفصل بين البلورات . غير أن هذا الاعتقاد يبدو قليل الاحتمال والاعتقاد الاكثر قبولاً هو أن حدود البلورات ليست سطوحاً مستوية أو ناعمة وانما كلها تعرجات وتداخلات صغيرة ذات مقاييس من مرتبة الابعاد الذرية في الهياكل الشبكية (انظر الشكل ٢ - ٢٢) ، وتكون الذرات السطحية عادة ذات مستويات أعلى من القدرة أي أبعد عن حالة التوازن من الذرات الموجودة داخل البلورة ، كما أن مناطق

الحدود هذه تكون محتوية على الكثير من الاخطاء البلورية . لهذا فان خواص حدود البلورات أو أطرافها تختلف عن خواص البلورات نفسها .



الشكل (٢ - ٢٢) : حدود البلورات .

و - حدود الاطوار : وهي لا تختلف عما ذكر في الفقرة السابقة عندما يكون كلا الطورين المتجاورين في الحالة الصلبة ، ويعتقد أنه عندما يكون أحد هذين الطورين في الحالة السائلة أو الغازية فان سطح بلورات الطور الصلب يكون أيضاً ذا تعرجات وتداخلات على غرار الحالة السابقة ، كما يعتقد أن حالة عدم التوازن التي تعانيها الذرات السطحية هي السبب في قابلية السطح الحر لربط ذرات غريبة من السائل أو الغاز الملامس لاذابتها أو الاتحاد معها .

* * *

الفصل الثالث

سبل التعرف على البنية الداخلية للمعادن ورقابة جودتها

توجد مجموعة كبيرة جداً من الطرق المختلفة لدراسة البنية البلورية للمعادن ورقابة جودتها ، ويمكن تقسيم هذه الطرق إلى أربع مجموعات :

المجموعة الأولى : وتضم طرق دراسة البنية الداخلية للبلورات - أي دراسة الشكل الهندسي للهيكل الشبكية وكيفية توضع الذرات في هذه الهياكل . وتأتي في مقدمة هذه الطرق طريقتا الأشعة السينية والأشعة الذاتية .

المجموعة الثانية : وتستخدم طرق هذه المجموعة للتعرف على البنية الخارجية للبلورات المعدنية - أي تحديد شكل البلورات وأبعادها ونوعية الاطوار المتبلورة ، ويتم ذلك باستخدام المجهر الضوئي الذي يمكن بواسطته أن نحصل على تكبير من مرتبة 10^2 مرة أو المجهر الإلكتروني الذي يمكن بواسطته الحصول على تكبير من مرتبة 10^4 مرة .

المجموعة الثالثة : وتضم هذه المجموعة الطرق الفيزيائية التي تستخدم لدراسة التحولات التي تحدث في المعادن والسبائك المختلفة ومنها طريقة التحليل الحراري والطريقة التسديدية وطريقة قياس المقاومة الكهربائية وغيرها .

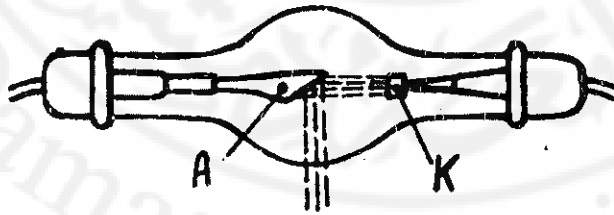
المجموعة الرابعة : وتضم طرق الكشف عن الاخطاء والعيوب الموجودة في قطع الآلات والمسبوكات المختلفة وبالتالي تحديد مدى صلاحية هذه القطع

والمسبوكات للاستخدام • ويدخل ضمن هذه المجموعة بعض الطرق من المجموعات الثلاث التي سبق ذكرها - مثل الأشعة السينية والمجهر الضوئي والمقاومة الكهربائية بالإضافة الى طرق أخرى مثل الطريقة المغناطيسية وطريقة الامواج فوق الصوتية وغيرها •

وسنورد فيما يلي وصفاً مختصراً لكل طريقة من الطرق آنفة الذكر وميزاتها ومجالات استخدامها :

٣-١- طرق دراسة البنية الداخلية للمعادن :

٣-١-١- الأشعة السينية : وهي اهتزازات الكتر ومغناطيسية ذات موجات قصيرة جداً ، إذ يتراوح طول موجاتها بين $A^\circ (2 \div 0,005)$ ، وكلما كان طول موجات الأشعة أقصر عُدَّتْ أفسى ، حيث المبدأ يتم حسب ماهو موضح في الشكل (٣-١) حيث يثبت في نهايتي انبوب زجاجي قطبان احدهما المهبط K وهو ملف من التنغستين والثاني المصعد A وهو قضيب معدني اسطواني الشكل تقريباً ، ويفرغ الانبوب الزجاجي من الهواء ، وعند تسخين ملف التنغستين بتيار منخفض التوتر تبدأ الالكترونات بالانطلاق من هذا الملف ، فاذا وصلنا قطبي الانبوب بمنبع للتيار المستمر عالي التوتر بحيث يصبح A القطب الموجب و K القطب



الشكل (٣-١) : توليد الأشعة السينية

السالب فان الالكترونات المنطلقة من الملف A سوف تنطلق باتجاه المصعد K بسرعة كبيرة يسكن حسابها من العلاقة التالية :

$$e U = \frac{m V^2}{2} \quad (3.1)$$

حيث : e - شحنة الالكترون ، U - توتر التيار الموصل على الأنبوب ، m - كتلة الالكترون ومنه : (Km sec.) $V \approx 600 \sqrt{U}$

أي أن سرعة الالكترونات ستكون أكبر كلما كبر توتر التيار الموصل على الأنبوب . وباصطدام الالكترونات بالمصعد فانها سوف تفقد سرعتها ، ويتحول الجزء الأكبر من قدرتها الحركية الى حرارة بينما جزء صغير من هذه القدرة سيتحول الى اهتزازات الكتر ومغناطيسية ، ويسكن حساب بلول موجة الاشعاعات الناتجة عن ذلك من معادلة إنشتاين :

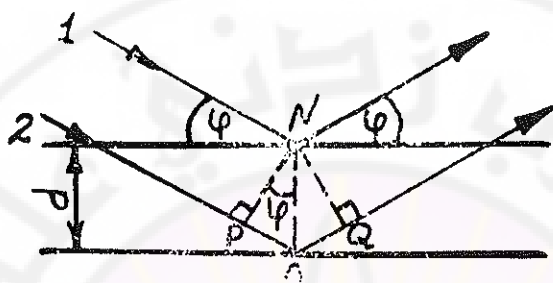
$$e U = \frac{m V^2}{2} = \frac{h c}{\lambda} \quad (3.2)$$

حيث : c - سرعة الضوء ، h - ثابت بلانك .

تتم الاستفادة من الاشعة السينية بأحد شكلين : إما عن طريق امتصاص هذه الاشعة أو انكسارها ، فخاصية الامتصاص تصلح في الكشف عن العيوب في المعادن والسبائك المعدنية وسوف نتحدث عن هذه الخاصية في حينها ، أما خاصية انكسار هذه الاشعة فيستفاد منها في دراسة البنية الداخلية للبلورات المعدنية - أي تحديد الشكل الهندسي للهيكل الشبكية وأبعاد هذه الهياكل . فلقد أصبح معروفاً أن طول موجة الاشعة السينية هو من مرتبة الابعاد بين المستويات الذرية في الهياكل الشبكية للبلورات ، وأثبت العالم براغ أن ظاهرة تداخل الاشعة السينية بعد تسليطها على هياكل شبكية ذات أبعاد فراغية ثلاثة يمكن عدّها ناتجة عن عملية

انعكاس عادية بسيطة، فلو فرضنا أنه لدينا في بنية بلورية ما مستويان ذريان متواريان
العدد بينهما d كما في الشكل (٢ - ٣) فإن الفرق بين مساري الشعاعين

2 و 1 المنعكسين عن المستويين الاول والثاني سيكون مقداره : $PO + OQ$.



الشكل (٣ - ٢) : إنتكسار الأشعة السينية

يتوافق الشعاعان ويتقوي أحدهما الآخر عندما يكون الفرق بين طولي المسارين مساويا للاضعاف الصحيحة لطول موجة الاشعة أي عندما يكون :

$$PO \div OQ = n \lambda \quad (3.3)$$

حاشیه ۶ - ۱۰۰ صحیح و بی‌سایه : ۳۲۶۱۰۰۰ الف

وبما أن $OP = OQ$ وأن: $PO = d \sin \varphi$ فإن:

$$n \lambda = 2 d \sin \varphi \quad (3.4)$$

وتسمى هذه العلاقة علاقة براغ ويمكن بواسطتها معرفة البعد a بين المستويين إذا علم طول موجة الأشعة وزاوية الانكسار θ حيث إن تداخل الأشعة بعد انعكاسها يتم عندما يكون فرق المسار مساوياً للاضعاف الصحيحة لطول الموجة كما رأينا ، فالتداخل الأول يحصل عندما يكون $n = 1$ والتداخل الثاني عندما $n = 2$ وهكذا . فبالنقاط الأشعة المنعكسة عن مستويات الهياكل الشبكية على فيلم حساس تتضح نقاط التداخلين الأول والثاني الخ ، ومن هذه

النقاط يسكن معرفة الزاوية θ وبالتالي حساب البعد بين المستويات .

٣-١-٢- الأشعة الذاتية : إن فقدان الإلكترونات لسرعتها عند اصطدامها بالمصعد لا يتم على مرحلة واحدة بل غالباً ما يكون على عدة مراحل ، لهذا فإن الاشعاعات المتولدة تكون متفاوتة في طول موجاتها . إضافة لهذه الاشعاعات فإنه غالباً ما يتولد نوع من الأشعة التي تتعلق طول موجاتها بنوع المعدن المصنوع منه المصعد وتسمى هذه الأشعة الأشعة المميزة أو الأشعة الذاتية للمصعد .

تطلق الأشعة الذاتية للمصعد عندما يصل التوتر في الأنبوب أو الصمام حداً معيناً يختلف باختلاف معدن المصعد وعندئذ تصبح القدرة الحركية للإلكترونات القادمة إلى المصعد كبيرة إلى حدٍ تستطيع معه اقتلاع بعض الكترونات المدارات الداخلية لذرات المصعد ، فتأتي الكترونات أخرى من المدارات الخارجية ذات القدرة الداخلية الأكبر تحتل أماكن الإلكترونات المقتلعة وفارق القدرة ينطق على شكل اشعاعات مميزة أو ذاتية . فعندما يكون الإلكترون القادم لاحتلال مكان الإلكترون المقتلع قادماً من الطبقة المدارية الثانية L تسمى الأشعة الناتجة أشعة K ، أما إذا كان هذا الإلكترون قادماً من الطبقة المدارية الثالثة فتسمى الأشعة الناتجة أشعة K_{β} .

تعلق في الوقت الحاضر أهمية كبيرة على الأشعة الذاتية وبخاصة الأشعة المنطلقة نتيجة اقتلاع الإلكترونات من الطبقة المدارية الأولى K ولها استخداماتها الخاصة في أبحاث متنوعة ومنها دراسة البنية الداخلية للمعادن والسبائك المختلفة والتحليل الكيفي والكمي للخلائط المعدنية .

نستطيع بصفة عامة أن نقول أن هناك عدة طرق تستخدم مبدأ تداخل الأشعة للكشف على نوعية الهياكل الشبكية وأبعاد هذه الهياكل . وهذه

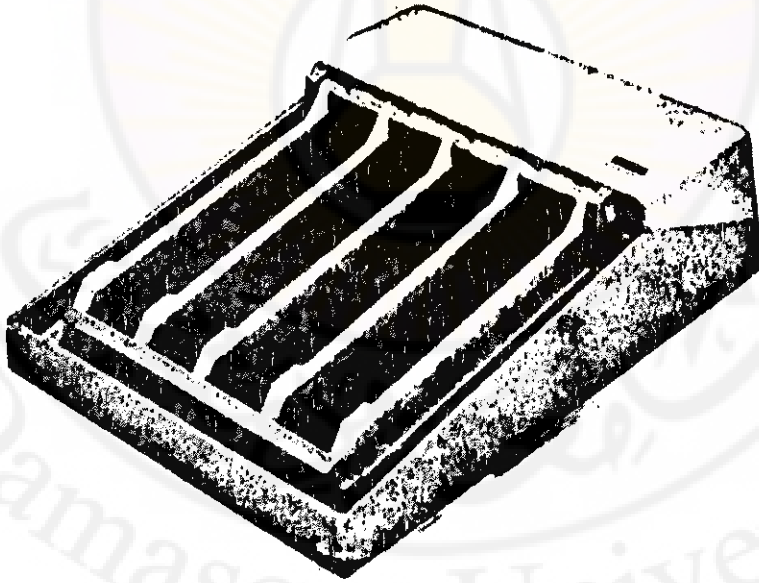
الطرق كلها متشابهة من حيث المبدأ إلا أنه تختلف عن بعضها بعضا باختلاف نوع العينات المستخدمة في الفحص من جهة وبنوعية الاشعة من جهة أخرى • فمنها ما يستخدم العينات ذات البلورة الواحدة ومنها ما يستخدم عينات كثيرة البلورات، أما من حيث نوعية الاشعة المستخدمة فمن هذه الطرق ما تستخدم الاشعة المتجانسة في طول موجاتها ومنها ما تستخدم الاشعة المركبة كما أن بعض هذه الطرق يستخدم الاشعة الذاتية المتجانسة •

٣ - ٢ - طرق دراسة البنية الخارجية للبلورات المعدنية :

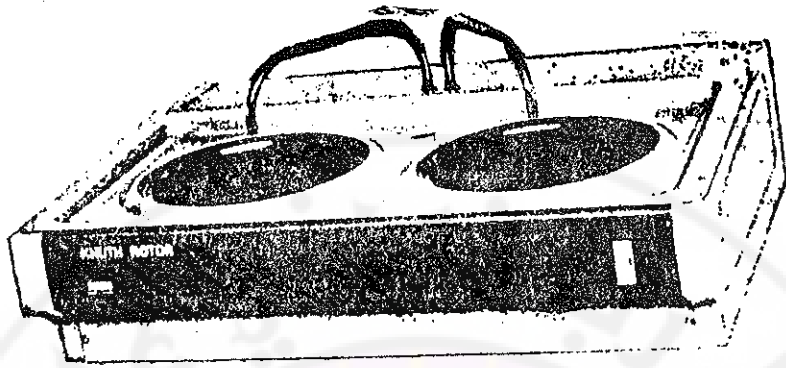
إن البلورات المعدنية في المعادن والخلائط المعدنية تختلف في أحجامها ضمن نطاق واسع ولكن تبقى في كل الحالات اصغر من أن نستطيع تمييزها بالعين المجردة • لهذا فلا بد من تكبيرها عددا من المرات بواسطة المجهر كي نستطيع التعرف على أشكالها ونوعيتها وكيفية توزيعها في البنية ، وهكذا فإن المجهر يعد من الوسائل الهامة في فحص البنية الصلبة للمعادن بخاصة وأنه بالفحص المجهرى نستطيع أن نكون فكرة سريعة عن بنية المعدن أو الخليطة وتركيبها الكيميائي وأخطاء التبلور التي قد توجد في البنية وغيرها من الامور الهامة • ولكن يجب أن نعلم أن العينات المعدنية المعدة للفحص بالمجهر الضوئي لا يمكن للضوء أن يخترقها ، لهذا فإن فحص هذه العينات يتطلب أن يكون المجهر مجهزا بتجهيزات خاصة بحيث بدلا من الاعتماد على اختراق الاشعة الضوئية للعينات الحيوية العادية يعتمد هنا على انعكاس الضوء من سطح العينة المعدنية • وبما أن سطح أي قطعة معدنية غالبا ما يكون غير متجانس وغير مستو ، لذا فانه لابد من تحضير سطح العينة المعدة للاختبار تحضيراً خاصاً • وسنورد فيما يلي مراحل تحضير العينة المعدة للفحص بالمجهر الضوئي :

٣-٢-١ - تحضير العينات للفحص بالمجهر الضوئي : تقطع العينة المعدنية عادةً من المشغولة المراد معرفة بنيتها البلورية ، وبعد أن يسوى سطحها (إذا كان خشناً أو غير مستوٍ) بمبرد ناعم يتم جلخه على سلسلة من أوراق الجلخ الخاصة المتسلسلة بنعومة حبيباتها بحيث يكون البدء بأكثرها خشونة والانتهاء بأكثرها نعومة ويجب أن يستمر الجلخ على كلٍ من هذه الأوراق حتى تختفي الخطوط الناجمة عن الجلخ على الورقة السابقة . والجلخ هذا يمكن أن يتم يدوياً على أوراق موضوعة على سطوح أفقية ناعمة أو مثبتة على جهاز خاص لهذه الغاية كالمبين في الشكل (٣ - ٣) ، أو آلياً باستعمال أوراق الجلخ المثبتة على قرص دوار كما في الشكل (٣ - ٤) حيث توضع العينات فوقه وتثبت بحامل يؤمن تلامسها مع ورقة الجلخ أثناء دورانها .

يتم بعد الانتهاء من الجلخ تنعيم السطح أو تلميعه باستعمال قرص دوار مماثل



الشكل (٣ - ٣) : جهاز لتنعيم سطح العينة مثبتة عليه أوراق الجلخ

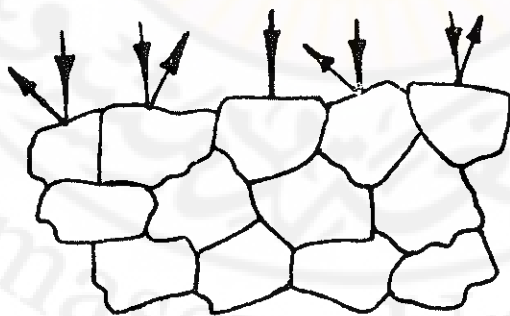


الشكل (٣ - ٤) : القرص الدوار مثبتة عليه أوراق الجليخ

للسابق ومغطى بقطعة من اللباد أو قماش النايلون ذي الخيوط الناعمة بعد تبلييل اللباد أو القماش يستحلب يحتوي على حبيبات ناعمة من الالومينا (أو أكسيد الالمنيوم) • وتستعمل في بعض الحالات مساحيق من أكاسيد أخرى مثل أكسيد الحديد أو الكروم وغيرها • ويستمر التلييع حتى يصبح السطح لماعاً خالياً من أي أثلام أو خدوش • والتلييع يسكن أن يتم يدوياً بسك العينة باليد أثناء تلييعها على القرص الدوار أو آلياً باستعمال حامل العينات المائل للمستعمل في عملية الجليخ •

إن السطح المستوي واللماع للعينة لا يزال غير صالح للفحص المجهرى إذ أن سطوح البلورات السطحية كافة قد أصبحت في مستو واحد وان انعكاس الضوء عن هذه السطوح سيكون بالشدة نفسها ولا يمكن في هذه الحالة التمييز بين البلورات لذلك تعقب عملية التلييع عملية أخرى هي عملية التخريش (أو التمشيش) - أي تغطيس العينة بأحد المحاليل المخرشة والتي تختلف باختلاف نوع العينة ، وغالباً ماتكون هذه المحاليل حوضاً مخفضة بالماء أو الكحول ، أو بعض الاملاح المذابة في إحدى هاتين المادتين (فمثلاً يستخدم في أغلب الاحيان محلول مؤلف من ١ - ٥ سم^٣ من حمض الآزوت HNO_3 لكل ١٠٠ سم^٣ من الكحول) • ووظيفة

المحلل المخرش هي اذابة طبقة قشرية رقيقة جدا من السطح بحيث يصبح سطح البلورة هو أقرب مستوياتها الذرية المتناسكة من السطح الافقي والسطح المجاور للعينة ، إذا فالذرات التي ستندوب في المحلول المخرش هي الذرات ضعيفة الارتباط بالبلورة نتيجة لوجودها في أماكن أو نقاط تعاني تشوهاً كبيراً في الهياكل الشبكية ، وأكثر المناطق تشوهاً هي الزوايا والحروف الفاصلة بين البلورات المتجاورة و سطوح البلورات التي غالباً ما تتشكل فيها نتيجة الجليخ والتلبيح طبقة رقيقة جداً ذات بنية تكاد تكون أقرب الى الامورفية منها إلى البلورية نظراً لكثرة التشوهات فيها وتسمى طبقة بايلي ، وبالإخلص من هذه الطبقة يصبح سطح البلورة كما ذكرنا أحد مستوياتها الذرية المنتظمة . عندئذ سوف يصبح لكل بلورة سطحها الخاص الذي يسيل على السطح الاصلي بزواوية تختلف عن زاوية ميل سطح البلورة المجاورة (انظر الشكل ٣ - ٥) ، وبالتالي عند وضع هذه العينة تحت المجهر فسوف تكون شدة الاشعة المنعكسة عن سطح كل بلورة مختلفة باختلاف زاوية ميل سطحها هذا على السطح الافقي وهكذا يصبح من السهل التمييز بين البلورات التي تتوضع حدودها ايضاً لكون الذوبان في المحاليل المخرشة يكون على أشده عند الحدود الفاصلة بين البلورات . وفي البنية متعددة الأطوار يكون تأثير كل من الاضوار الموجودة فيها بالمحاليل المخرشة مختلفاً عن



الشكل (٣ - ٥) : إنعكاس الاشعة الضوئية عن سطوح بلورات مختلفة الميل

الاطوار الاخرى فالطور الاكثر تأثراً سيكون فيه الذوبان أكثر وبالتالي فسطوح بلوراته سوف تصبح أكثر ميلاً على السطح الاصلي من الطور الاقل تأثراً وهكذا يمكن التمييز بين الأطوار المختلفة •

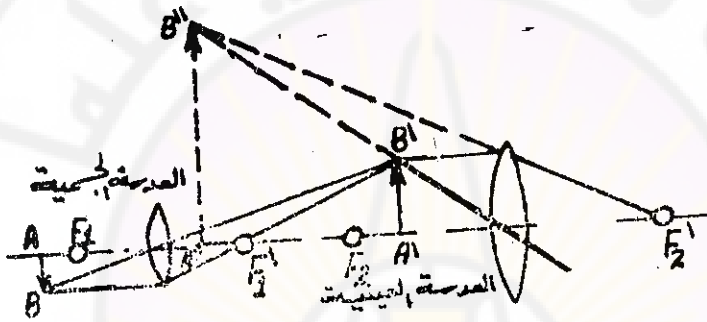
ونود أن نوه الى أنه تستخدم في بعض الاحيان لتخريش العينات محاليل تكون على سطح العينة رواسب ناتجة عن التفاعل بين مركبات المحلول المستخدم • وتختلف سماكة الراسب باختلاف نوع الطور المتشكل عليه هذا الراسب مما يتيح الحصول على درجات لونية مختلفة عند الفحص المجهرى للعينات المخرشة بهذه المحاليل •

ويمكن أحياناً أن تستخدم طريقة تخريش اخرى تدعى بطريقة التخريش الحراري ، وتتلخص هذه الطريقة في تسخين العينة المراد فحصها مجهرياً في وسط مؤكسد تتراوح درجة حرارته بين ٢٠٠ - ٦٠٠°م وذلك حسب تركيب الخليطة • وتختلف سماكة طبقة الاكاسيد المتشكلة نتيجة لهذا التسخين باختلاف نوع الطور المتشكل على سطحه هذه الاكاسيد مما يؤدي الى ظهورها تحت المجهر بألوان مختلفة •

هناك طريقة تخريش نادرة الاستعمال تعتمد في مبدئها على ظاهرة تفاوت التبخر بين طور وآخر وبين جسم البلورات وحدودها وذلك عند تسخين العينة في الفراغ • وتسمح هذه الطريقة بفحص العينة مجهرياً سواء أثناء تسخين العينة أو أثناء تبريدها •

٢-٢-٣ - المجهر الضوئي : يتكون المجهر الضوئي من مجموعتين من العدسات مركبتين على نهايتي انبوب يسمى جسم المجهر وتسمى مجموعة العدسات الموجودة في نهاية الجسم القريبة من عينة الاختبار العدسة الجسمية أما المجموعة الكائنة في بداية الانبوب والتي تتم منها الرؤية فتسمى العدسة العينية • ويوضح الرسم التخطيطي المبين في الشكل (٣ - ٦) مبدأ التكبير في المجهر الضوئي :

حيث يتم وضع الجسم AB على بعد ما خارج محرق العدسة الجسمية فيتشكل له خيال حقيقي $A'B'$ ويختار وضع مجسوتي العدسات ووضع الجسم بحيث يتم تشكل هذا الخيال بين العدسة العينية ومحرقها ، فإذا نظرنا من العدسة العينية فالتا سوف نرى للجسم خيالا وهيا مقلوبا $A''B''$ أكبر من الجسم بعدد من المرات يتعلق بتكبير العدستين (الجسمية والعينية) حيث أن مقدار التكبير الذي نحصل عليه هو جداء تكبير كل من العدستين أي أن : $N = N_1 \times N_2$.



الشكل (٣ - ٦) : مبدأ التكبير في المجهر الضوئي

ويجب أن نذكر هنا أن تكبير المجهر يسكن زيادته ولكن ضمن حدود

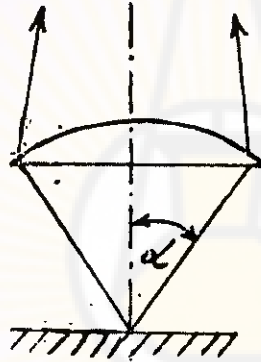
معينة ، فزيادة التكبير خارج هذه الحدود يصبح عديم الفائدة ولا يظهر أي تفاصيل جديدة .

إن التكبير المفيد أو الفعال للمجهر يتعلق بالدرجة الاولى بما يسمى مقدرة المجهر على الفصل أو التحليل والتي تتعلق فقط بالعدسة الجسمية للمجهر إذ أن وظيفة العدسة العينية تنحصر بتكبير الخيال الذي تكونه العدسة الجسمية ، وهكذا فإن المبالغة بتكبير العدسة العينية لافائدة منها . أما مقدرة الفصل (أو التفريق) فهي أصغر مسافة (d) بين خطين تمكنا العدسة من التمييز بينهما ، وتتعلق هذه المسافة بطول موجة الضوء المستخدم (λ) وبما يُسمى

الفتحة الرقمية للعدسة (u) حيث :

$$d = \frac{\lambda}{a} \quad (3.5)$$

أي ان مقدرة العدسة على الفصل تكون أكبر كلما كان طول موجة الاشعة الضوئية اصغر او كلما كانت الفتحة الرقمية للعدسة أكبر ، حيث ان ازدياد المقدرة على الفصل (أو التفريق) يعني نقصان قيسة (d) ، أما الفتحة الرقمية للعدسة فهي جيب نصف الزاوية الرأسية (α) لمخروط الاشعة المنعكسة عن نقطة ما من سطح الجسم والتي يمكن العدسة أن تلتقطها لتكوين اخلايال (انظر الشكل ٣-٧) .



الشكل (٣ - ٧) : الفتحة الرقمية للعدسة

ومن البدهي أن هذه الزاوية لايمكن أن تكون أكبر من 90° أو بالاحرى يكون الحد الاعظمي النظري للفتحة الرقمية هو جيب $90^\circ = 1$ ، ولكن عملياً لايمكن صنع عدسات تزيد فتحتها الرقمية عن 0.95 ، غير أنه يمكن زيادة الفتحة الرقمية للعدسة باستبدال الهواء الفاصل بين العدسة و سطح الجسم بوسط ما قرينة انكساره n أكبر من « ١ » وكثيرا ما يستعمل لهذه الغاية زيت بذور الكتان والذي قرينة انكساره نحو 1.5 ، عندئذ تصبح الفتحة الرقمية :

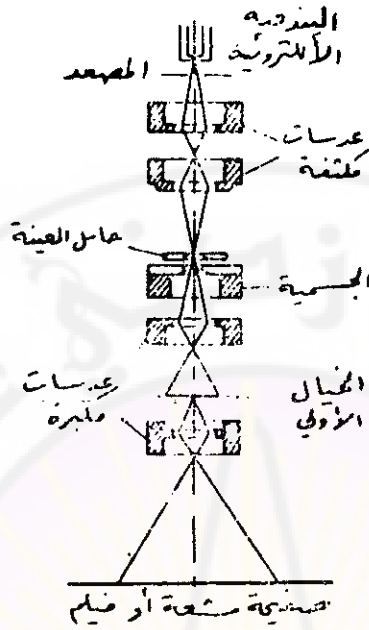
$$a = n \cdot \sin \alpha$$

(3.6)

لقد ثبت علماً أن مقدرة الفصل عند المجهر الضوئي لا تتعدى ٠.٢ ميكروناً (أي ٢٠٠٠ أنغستروم)، أي أنه لا يمكن استخدام المجهر الضوئي لتسييز دقائق البنية التي تقل أبعادها عن ٠.٢ ميكروناً . وهذا يعني أن أقصى تكبير يمكن الاستفادة منه في المجهر الضوئي هو ٢٠٠٠ مرة ، ولا تؤدي زيادة التكبير عن هذا الحد الى الكشف عن اية تفاصيل جديدة أصغر في البنية التسيي تجري دراستها .

٣-٢-٣ - المجهر الإلكتروني : انتشر في السنوات الاخيرة استخدام المجاهر الإلكترونية والتي تتمتع بمقدرة على الفصل تزيد كثيراً جداً عن مثيلاتها في المجاهر الضوئية مما يمكن من دراسة تفاصيل أدق في بنية المعادن . وتستخدم في المجاهر الإلكترونية الاشعة الإلكترونية المنطلقة من مولدٍ خاص يسمى المدفع الإلكتروني، وتتميز هذه الاشعة بأن موجاتها قصيرة جداً ، إذ تتراوح أطوال موجاتها بين (٠.٠٤ ÷ ٠.١٢) أنغستروماً مما يتيح امكان الدراسة الدقيقة لعناصر البنية التي أبعادها من مرتبة أبعاد الهيكل الشبكي (أي ٢ ÷ ٥ أنغسترومات) .

يوضح الشكل (٣ - ٨) مبدأ استخدام الاشعة الإلكترونية في الفحص المجري (أي بشكل تخطيطي مبدأ المجهر الإلكتروني) ، حيث تنبعث حزمة الإلكترونات من المهبط (اوب من معدن التنجستن) عند تسخينه . ويؤثر بين المهبط والمصعد مجال كهربائي هائل ذلك لان فرق الكون بين المهبط والمصعد يتراوح بين ٥٠ ÷ ١٥٠ كيلو فولطاً ، ويؤدي هذا الى تحرك الإلكترونات باتجاه المصعد بسرعة هائلة . وتعتبر حزمة الإلكترونات ثقباً في المصعد الى العدسات المكثفة . والعدسات في المجهر الإلكتروني هي وشائع مغناطيسية ، اذ بمساعدة تيار التحريض المار بكل من هذه الوشائع فان الاشعة الإلكترونية المارة عبر



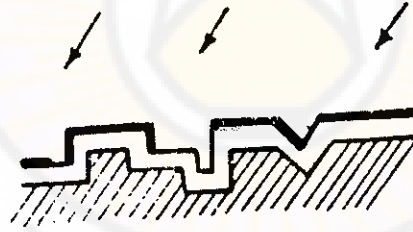
الشكل (٣-٨) : رسم تخطيطي للمجهر الالكتروني

الوشية تنحرف وتتجمع في محرقها ويكون عمل الوشية مشابها تماما لعمل العدسة الضوئية . تجمع العدسات المكثفة الاشعة في مركز فتحة الصفيحة الحاملة لعينة الاختبار ، وبمرور الاشعة بالعدسات الجسمية يتكون للعينة خيال أولي داخل المجهر ، وبلاستعانة بعدسة مكبرة يتشكل خيال آخر مكبر على صفيحة مشعة تجعل الخيال مرئيا ، كما يمكن أن يستبدل بهذه الصفيحة فيلم تصوير حساس والتقاط صورة للجسم .

يتضح لنا ما ورد آنفاً أن المجهر الالكتروني يعمل بمبدأ اختراق الاشعة الالكترونية لعينة الاختبار لذلك فانه بعد ان يتم تحضير العينة بالطريقة نفسها التي اتبعناها للفحص بالمجهر الضوئي ، فأما أن تقطع شريحة رقيقة جدا من سطح العينة بوز سماكتها ٠.٠٥ ميكرونا ، أو أن تشكل طبقة قشرية لسطح العينة ويجري

الاختبار على هذه الطبقة بدلا من السطح المباشر للعينة ، وهذه الطريقة أسهل وأكثر انتشارا من السابقة . أما تشكيل الطبقة فيمكن أن يتم بأكثر من طريقة . عندما يكون المعدن أو الخليطة المراد اختبارها سهل التأكسد تجري عملية أكسدة قسرية للطبقة السطحية ثم تفصل القشرة الاوكسيدية هذه بإذابة المعدن من تحتها ويجري الاختبار على القشرة الناتجة والتي تأخذ تعرجاتها تعرجات السطح الأصلي نفسها قبل عملية الأكسدة .

إن أسهل طرق تشكيل الطبقة هي طلاء السطح بمادة بلاستيكية وتركها حتى تتصلب ، وبعدئذ تنزع وتكون جاهزة للاستعمال مباشرة حيث يأخذ سطحها السفلي شكل سطح العينة نفسه بينما يكون سطحها العلوي مستويا تقريبا (انظر الشكل ٣ - ٩) ، واختلاف سماكة القشرة حسب شكل السطح يسهل عملية الاختبار . غير أن من سيئات هذه الطريقة أن المواد البلاستيكية تنقلص عند تعرضها للأشعة الالكترونية كما أن كبر جزيئات هذه المواد يجعلها غير قادرة على اظهار التفاصيل الدقيقة لسطح العينة .



الشكل (٣ - ٩) : اعداد الطبقة البلاستيكية لفحصها بالمجهر الالكتروني

إن أكثر الطرق استعمالا هي طريقة الطبقة الفحمية ، حيث يتم ترسيب طبقة من الفحم على سطح العينة وذلك بتبخير الفحم فوق العينة في حجرة مفرغة من الهواء . غير أن القشرة المتشكلة تكون متجانسة من حيث السماكة (انظر الشكل ٣ - ١٠) ، لذلك ولاظهار تعرجات سطح العينة يلجأ عادة الى عملية التضييل

التي تتم بترسيب طبقة جديدة من أحد المعادن الكريمة فوق القشرة الفحمية بالتبخير أيضا ولكن بزاوية ميل معينة بحيث تترسب هذه الطبقة على أحد جوانب التواءات دون الجوانب الأخرى فيسهل عندئذ تمييز تعرجات السطح .



الشكل (٣ - ١٠) : اعداد الطبقة الفحمية لفحصها بالمجهر الالكتروني

٢ - ٣ - طرق دراسة التحولات التي تحدث في المعادن والخلائط المعدنية:

يُتبع عادة لدراسة التحولات التي تحدث في المعادن والخلائط المعدنية مجموعة من الطرق تسمى الطرق الفيزيائية ، لهذا تسمى الدراسة المتبعة في هذه الحالة التحليل الفيزيائي . ويجب أن نعلم أن الخواص الفيزيائية للخليطة المعدنية تتعلق بالدرجة الاولى بتركيب هذه الخليطة وبالتغيرات التي تطرأ على بنية هذه الخليطة بسبب معاملتها حراريا أو ميكانيكيا أو معاملتها حراريا وميكانيكيا في آن واحد .

غالباً ماتم دراسة علاقة الخواص الفيزيائية بتغير تركيب هذه الخليطة (أي تركيبها الكيميائي) ودرجة حرارتها بالإضافة لعامل الزمن . وتتيح هذه الدراسة المتكاملة للكشف عن جوهر التحولات التي تحدث في الخلائط المعدنية بتغير العوامل الثلاثة آتفة الذكر وهي : التركيب - الحرارة - الزمن . وسنورد فيما يلي بعض الطرق الفيزيائية المتبعة في الوقت الحاضر لدراسة التحولات في المعادن والخلائط المعدنية :

٢-٣-١ - طريقة التحليل الحراري :

ترافق التحولات التي تحدث في المعادن والخلائط المعدنية عادة بانطلاق حرارة أو بامتصاصها ، لهذا فإن الغاية من التحليل الحراري هي معرفة درجات الحرارة أو المجال الحراري الذي تحدث عنده هذه التحولات • ويتم ذلك إما بتسخين العينة المراد دراستها (أو تبريدها) وتسجيل التغيرات التي تطرأ على درجات الحرارة بتغير الزمن ومن ثم رسم المنحنيات التي تبين علاقة درجة حرارة المعدن (أو الخليطة) بالزمن ، وبالتالي فإن التغيرات التي تحدث في المعدن (أو الخليطة) سوف تظهر على منحنيات التسخين «أو التبريد» على شكل : إما نقطة انعطاف على المنحني أو انقطاع في هذا المنحني يعقبه خط أفقي يدل على ثبات درجة الحرارة خلال فترة زمنية معينة • وهكذا يتم تعيين درجات الحرارة (أو المجالات الحرارية) التي تتم عندها هذه التحولات •

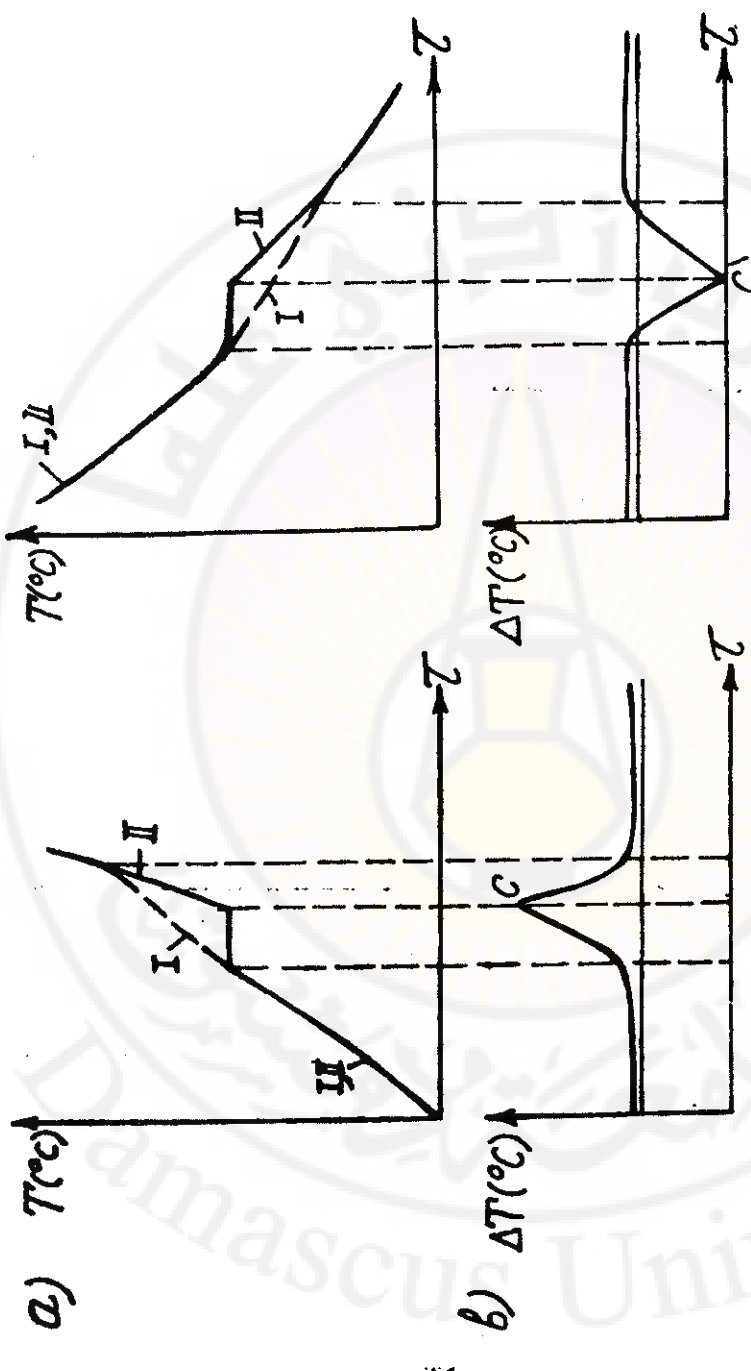
عند مرور المعدن النقي بتحول طوري (أي تحوله من الحالة السائلة إلى الصلبة أو العكس) فإن هذا التحول يظهر على شكل خط أفقي ثم يتابع المنحني سيره بالشكل نفسه أي كما لو كان استمرارا للجزء ما قبل الخط الأفقي (انظر المنحني II على الشكل ٣-١١ a) •

ونود أن ننوه أنه في الوقت الحاضر تستخدم ما يسمى الطريقة التفاضلية للتحليل الحراري ، حيث يتم في هذه الحالة تعيين الفرق بين درجات حرارة المعدن المراد دراسته وعينة معدنية أخرى تستخدم كنسودج ولا تمر هذه الأخيرة بأية تحولات وذلك أثناء تسخينها أو تبريدها معا وفي الشروط نفسها • ويبين الشكل (٣-١١ b) منحنيات التسخين والتبريد الناتجة باستخدام هذه الطريقة ، حيث نلاحظ أن النقاط الاعظمية (الذروة) على الشكل السفلي تعني نهاية التحول الطوري عند المعدن المختبر •

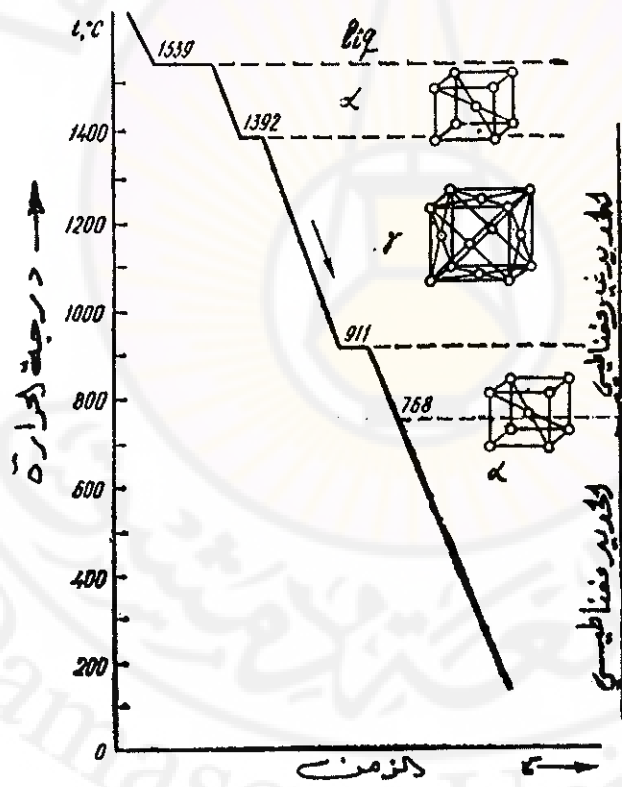
وتبريدها .

تسخين العينة القياسية (المستخدمة للمعايرة) والعينة الجارية اختبارها (أي التي يحدث بها تحول طوري) .

الشكل (٣ - ١١) : رسم تخطيطي لتغير درجات الحرارة $T(^{\circ}C)$ ولتفاوت درجات الحرارة $\Delta T(^{\circ}C)$ أثناء



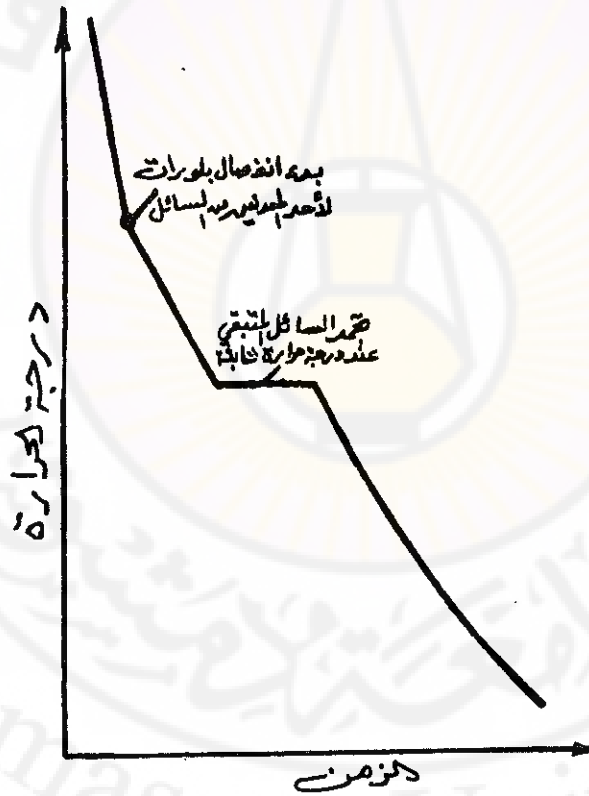
وتستخدم طريقة التحليل الحراري هذه أيضا لدراسة التغيرات الآلوتروبية في بعض المعادن التي يمكن أن يحدث بها هذا النوع من التغيرات . فالتغير الآلوتروبي : تغير شكل الهيكل الشبكي للمعدن في الحالة الصلبة وعند درجة حرارة معينة ، ويرافق هذا التغير ثبات في درجة الحرارة على منحنى التسخين أو التبريد مما يدل على أن التغير الآلوتروبي يترافق بامتصاص حرارة من قبل ذرات المعدن عند التسخين أو باطلاق حرارة من قبل هذه الذرات عند التبريد . ويبين الشكل (٣ - ١٢) منحنى تبريد الحديد النقي، إذ نلاحظ على هذا الشكل أن الحديد بعد تجمده يخضع أثناء تبريده إلى درجة الحرارة العادية لتغيرين آلوتروبيين ، فالحديد أول ما يتجمد تكون هيكله الشبكية على شكل مكعبات



الشكل (٣ - ١٢) : منحنى تبريد الحديد

متمركزة حجماً ، وفي الدرجة (1392°C) تتحول الهياكل الشبكية الى مكعبات متمركزة وجهاً ثم لاتلبث أن تعود هذه الهياكل من جديد الى المكعبات المتمركزة حجماً وذلك عند درجة الحرارة (911°C) .

ونود أن ننوه الى أنه عند الدرجة (768°C) والتي تسمى بنقطة كيوري لا يحدث أي تغير في شكل الهياكل الشبكية (أي لا يحدث تغير آلوتروبي عند هذه الدرجة) وإنما ثبت تجريبياً أن الحديد عند درجة حرارة أعلى من (768°C) يكون غير مغناطيسي بينما يكتسب صفات المغناطيسية تحت هذه الدرجة .



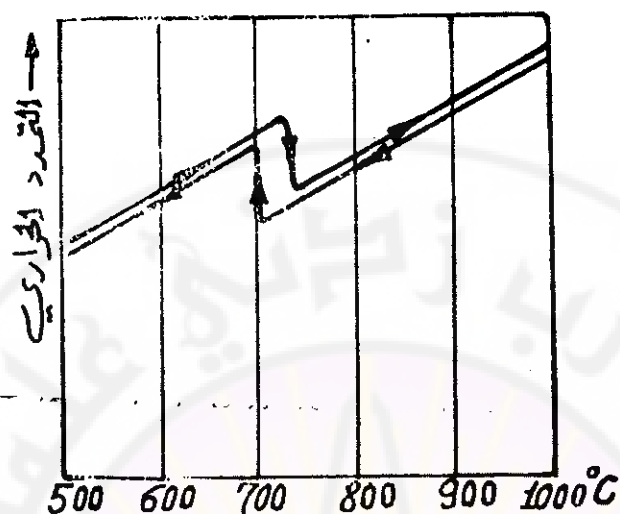
الشكل (٣ - ١٣) : منحنى تبريد خليطة من معدنين .

وتلقى طريقة التحليل الحراري استخداما كبيرا في دراسة كيفية تبلور الخلائط المعدنية وفي الكشف عن التحولات التي تحدث في هذه الخلائط وذلك سواء كانت الخليطة مؤلفة من معدنين أو أكثر . ففي الخلائط الثنائية كثيرا ما ينصادف في المستقبل منحنيات تبريد من النوع الموجود على الشكل (٣ - ١٣) ، حيث نشاهد نقطة انعطاف في هذا المنحني تدل على أن احد المعدنين قد بدأ يفصل عن مصهور الخليطة على شكل بلورات صلبة ، أما الخط الافقي على الشكل (٣ - ١٣) فيدل على أن المصهور المتبقي قد تباور عند درجة حرارة ثابتة ، ويستمر هذا الخط الافقي حتى انتهاء عملية التبلور ثم يتابع منحني التبريد شكله الأصلي حتى درجة الحرارة العادية .

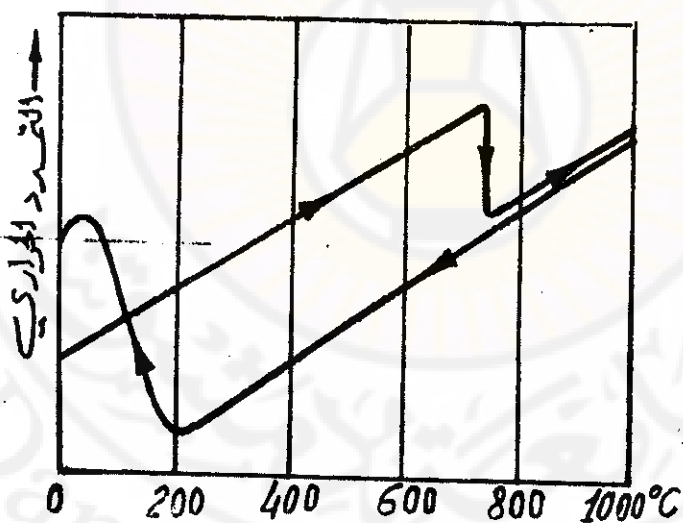
٢ - ٣ - ٢ - الطريقة التمددية :

تقوم هذه الطريقة على حقيقة أن حجم المعدن (أو الخليطة المعدنية) يتغير أثناء التحولات الطورية أو الألوتروبية وذلك عند بلوغ المعدن (أو الخليطة) لدرجات حرارة التحول . فعند بلوغ درجات الحرارة هذه فإن تغير حجم العينة المعدنية لا يتوقف على مبدأ التمدد (أو التقلص) الحراري بقدر ما يتوقف على التحولات التي تتم ، إذ يحدث في هذه الحالة تمدد حاد (أو تقلص حاد) ، مما يؤدي الى تغير مفاجئ في منحني التمدد (أو التقلص) إلى أسفل أو إلى أعلى (انظر الشكلين ٣ - ١٤ و ٣ - ١٥) .

فالشكل (٣ - ١٤) يبين أن التغير من أوستينيت الى برليت يرافقه تغير مفاجئ في الحجم ، فالحديد الصافي عندما يتحول من حديد إلى حديد « يرافقه ازدياد في الحجم أي تمدد ، وهذا التمدد يحدث أيضاً في خلائط الحديد والكربون وإن لم يكن بالمقدار نفسه . إذا فتحول البنية البرليتية الى أوستينيت يرافقه تقلص في الحجم بينما من أوستينيت الى مارتسنت يرافقه تمدد حجمي أكبر من ذلك الذي يرافق التحول الى برليت (انظر الشكل ٣ - ١٥) ، ذلك لأن التحول



الشكل (٣ - ١٤) : منحنيات التمدد (التقلص) الحراري للفولاذ المحتوي على (0,8% C) وذلك عند التسخين البطيء والتبريد البطيء أيضا .



الشكل (٣ - ١٥) : منحنيات التمدد (التقلص) الحراري للفولاذ المحتوي على (0,8% C) وذلك عند التسخين البطيء والتبريد السريع .

من حديد γ الى حديد α نفسه هو تردد ، ويزيد من مقدار هذا التردد في حالة التحول الى مارتنيسيت بقاء ذرات الكربون الزائدة عن قابلية الذوبان مذابة بشكل قسري ، الأمر الذي يجعل الهيكل الشبكي لبلورة المارتنيسيت يأخذ حجماً أكبر من الهيكل الأصلي لحديد α .

٣-٢-٢- طريقة قياس المقاومة الكهربائية :

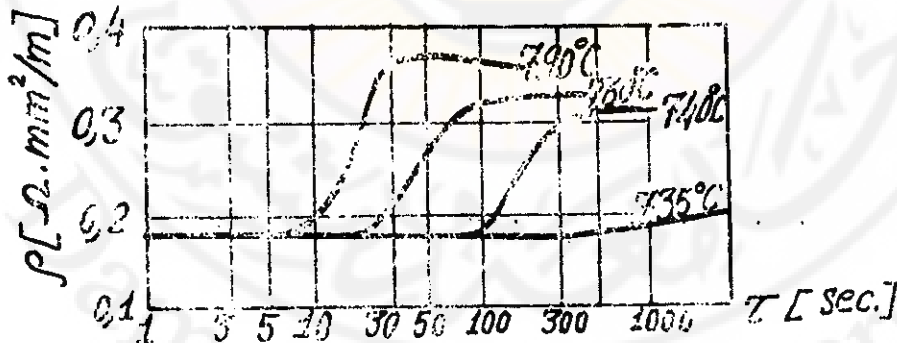
تعد طريقة قياس المقاومة الكهربائية النوعية من أكثر الطرق الفيزيائية استخداماً .

نحن نعلم أنه يمكن تعيين المقاومة الكهربائية النوعية ρ لعينة طولها l ومساحة مقطعها S من العلاقة :

$$\rho = RS / l \quad [\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}]$$

حيث : R - مقاومة العينة المعدنية مقدرة بالأوم $[\Omega]$.

ويُبين الشكل (٣ - ١٦) مثلاً تجريبياً لاستخدام طريقة قياس المقاومة الكهربائية النوعية في تحديد الفترة الزمنية اللازمة لبدء تحول البرليت الى



الشكل (٣ - ١٦) : استخدام طريقة قياس المقاومة الكهربائية النوعية في تحديد الفترة الزمنية اللازمة لبدء تحول البرليت الى أوستينيت وانتهائه .

أوستينيت وانتهائه وعلاقة ذلك بدرجة الحرارة المسخن إليها الفولاذ • نلاحظ من الشكل (٣ - ١٦) أن المقاومة النوعية للبرليت ثابتة تقريباً بتغير درجة الحرارة إلا أن هذه المقاومة تبدأ بالتزايد عندما يبدأ البرليت بالتحول إلى أوستينيت وتستمر بالازدياد حتى ينتهي هذا التحول لتعود وتأخذ قيمة ثابتة جديدة • ويمكن بهذه الطريقة تحديد نقاط بدء التحول وانتهائه • وبالتالي معرفة الزمن الذي يستغرقه التحول عند كل درجة حرارة •

٣ - ٢ - ٤ - طريقة اقتفاء أثر العناصر المشعة :

إن الهدف الأساسي من هذه الطريقة هو مراقبة توزيع العناصر المختلفة وانتشارها في السبائك • وتعتمد هذه الطريقة على التطابق التام بين الخواص الفيزيائية والكيميائية للمعدن المستقر (أي غير المشع) ولنظيره المشع • فمن وجهة النظر الكيميائية مثلاً لا يمكننا أن نميز بين عنصرين للسعدن نفسه أحدهما مشع والآخر مستقر وموجودان في الخليطة المعدنية نفسها • والطريقة الوحيدة للتمييز هي متابعة حركة ذرات النظير المشع وذلك عن طريق تسجيل ما تطلقه هذه الذرات من إشعاعات ، وتسمى هذه الطريقة اقتفاء أثر العناصر المشعة في الخلائط المعدنية • ويجب أن نعلم أن الإشعاعات المنطلقة من النظائر المشعة ثلاثة أنواع وهي :

أشعة α - وهي أنوية الهليوم ذات الشحنة الموجبة •

أشعة β - وهي تيار من الإلكترونات المتحركة بسرعة قريبة من سرعة الضوء •

أشعة γ - وهي أشعة كهرومغناطيسية تشبه الأشعة السينية وإن كانت أطوال أمواجها أصغر بكثير •

وتتم الدراسة بطريقة اقتفاء الأثر على الشكل التالي : يضاف العنصر المشع إلى المعدن المطلوب درسته أثناء عملية صهر هذا المعدن • وبعد تجدد المعدن

وتبريده يتم تسجيل الاشعة المنطلقة من ذرات العنصر المشع الموجودة في الداخل على ألواح حساسة ، حيث يؤدي تأثير هذه الإشعاعات الى اسوداد اللوحات الحساسة . فاذا وضعنا العينة المعدنية المحتوية بداخلها على ذرات عنصر مشع على لوح حساس من نوع خاص ، ثم قمنا بعد ذلك بتحريض هذا اللوح الحساس فانه تظهر عليه نقاط قاتمة تناظر في توزيعها العنصر المشع داخل العينة ، وبذلك يتم الحكم على كيفية توزيع ذرات العنصر المشع (أي نظيره السبائكي) في الخليطة المعدنية .

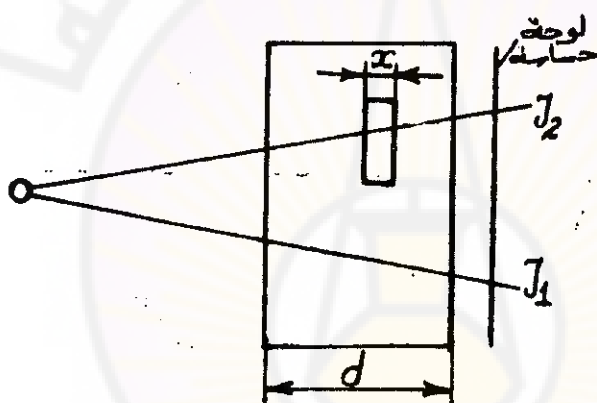
٣ - ٤ - الطرق الفيزيائية للكشف عن العيوب في المعادن والخلائط المعدنية :

كثرت في الآونة الأخيرة الاختبارات والأبحاث التي تجرى للكشف عن العيوب التي يسكن أن تتواجد في قطع الآلات والمسبوكات والوصلات اللحامية وغيرها . وعلى الرغم من تنوع طرق الاختبار والبحث في هذا المجال واختلافها من حيث المبدأ إلا أن الهدف الأساسي من هذا كله يبقى الكشف عن العيب بأسهل الطرق وأسرعها وأكثرها دقة في تحديد مكان تواجد العيب وتعيين أبعاده إن أمكن ذلك . ولهذا سوف يقتصر حديثنا هنا على التعرف على الأسس التي تعتمد عليها أكثر هذه الاختبارات شيوعاً وأهمية دون التوقف وبشكل مفصل على طرق الاختبار التي لا تزال قيد الدراسة والبحث .

٣ - ٤ - ١ - الكشف عن العيوب باستخدام الاشعة السينية :

تستعمل الاشعة السينية في الكشف عن الفقاعات والفجوات والشقوق التي قد تحصل أثناء عمليات السكب أو اللحام أو التشكيل وغيرها وذلك دون إحداث أي تغيير في شكل القطع المختبرة بهذه الطريقة أو تركيبها .

ويعتمد استعمال هذه الطريقة على مبدأ امتصاص الاشعة السينية وبالتالي الفرق بين كثافة الاشعة المخترقة للاجزاء السليمة والاشعة المخترقة للاجزاء المحتوية على العيب . فلو فرضنا أنه لدينا قطعة معدنية كالمبينة في الشكل (٣ - ١٧) سماكتها (d) وتحتوي على فجوة أو فقاعة غازية بداخلها سماكتها (x) وعرضنا هذه القطعة للاشعة السينية ثم التقطنا الاشعة الخارجة من الجانب الآخر على لوحة حساسة فان شدة الاشعة التي لا تمر عبر الفقاعة سوف تكون (J_1) بينما شدة الشعاع الذي يخترق الفقاعة أو الفجوة ستكون (J_2) .



الشكل (٣ - ١٧) رسم تخطيطي لطريقة كشف العيوب باستخدام الاشعة السينية

فاذا فرضنا أن شدة الشعاع السيني المسلط على القطعة المعدنية (J_0) فان :

$$J_1 = J_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \quad (3.7)$$

حيث : d - سماكة القطعة المعدنية .

μ - عامل تناقص شدة الأشعة ويتكون من عاملين :

$$\mu = \bar{\mu} + \sigma \quad (3.8)$$

وهنا (μ) عامل تناثر الأشعة وهو تقريبا ثابت لا يتعلق بنوع المادة أو طول موجة الأشعة . ($\bar{\mu}$) عامل الامتصاص ويتعلق بالدرجة الاولى بنوع الجسم الصلب الذي تخترقه الأشعة وبطول موجة هذه الأشعة .

أما شدة الشعاع (J_2) فتعطى بالعلاقة :

$$J_2 = J_0 e^{-\mu (d - x)} \quad (3.9)$$

ومنه فإن :

$$\frac{J_2}{J_1} = e^{-\mu x} \quad (3.10)$$

وبما أن شدة الشعاعين (J_1) و (J_2) يمكن تحديدها على اللوحة فإنه يمكن من العلاقة الأخيرة تعيين سماكة العيب الموجود في القطعة المدنية المختبرة .

ونود أن ننوه الى أنه يمكن في الوقت الحاضر استخدام أجهزة الأشعة السينية في الكشف عن العيوب في مصبوبات الفولاذ التي تصل سماكاتها الى (٧٠ ÷ ٨٠ مم) ، أو في سبائك الألمنيوم التي تبلغ سماكاتها (٣٢٥ ÷ ٢٧٥ مم) أو سبائك النحاس التي تصل سماكاتها الى (٤٠ ÷ ٥٠ مم) الخ .

ويجب أن نعلم أنه للكشف عن العيوب في المصبوبات الفولاذية التي تزيد سماكاتها عن (٥٠ مم) تستخدم أشعة (γ) ذلك لأن قصر أمواج هذه الأشعة بالمقارنة مع الأشعة السينية يفسح المجال للكشف عن العيوب في الفولاذ الذي تصل سماكاتها الى (٢٥٠ ÷ ٣٠٠ مم) .

٣ - ٤ - ٢ - الكشف عن العيوب باستخدام الموجات فوق الصوتية :

تعد طريقة الكشف عن العيوب باستخدام الموجات فوق الصوتية من أهم

طرق الكشف عن العيوب في الوقت الحاضر وأكثرها استعمالاً وذلك لعدة أسباب أهمها :

١ - سهولة الاستخدام وقلة الكلفة .

٢ - صلاحيتها لاختبار القطع سميكة الجدران وفي درجات الحرارة العادية والمنخفضة جداً وذلك نظراً لعدم تأثر هذه الموجات بدرجة حرارة القطع المختبرة .

٣ - مقدرة هذه الطريقة حتى على كشف العيوب الصغيرة وتحديد عمقها النسبي .

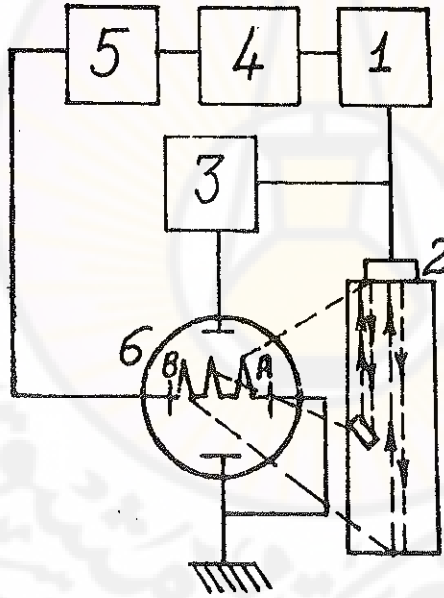
أما المبدأ في هذه الطريقة فهو كالآتي :

إذا أرسلنا من نقطة ما على سطح القطعة المعدنية موجات فوق الصوتية عالية التردد (أي مقدرة بواحدات الميغا هرتز) بشكل عمودي على هذا السطح ، فإن هذه الموجات سوف ينعكس قسم منها عند اصطدامها بالسطح وينعكس قسم آخر من هذه الموجات من السطح المقابل (أي بعد أن تكون قد اخترقت القطعة بكامل سماكتها) ، فلو التقطنا الموجات المنعكسة عن كل من السطحين فإن التقاطهما سيكون بفارق زمني يتناسب طردياً مع سماكة القطعة (أي المسافة بين السطحين) وبعكساً مع سرعة انتشار الموجات ضمن مادة القطعة . وبمعرفتنا لسرعة انتشار الموجات في مادة القطعة ، والفارق الزمني بين الانعكاسين فائتاً نستطيع أن نحسب سماكة القطعة .

وفي حال وجود عيب ما داخل القطعة (فجوة أو فقاعة غازية أو شق) وعلى عمق ما من سطح القطعة فإن انعكاساً ثالثاً سوف يحدث للموجات ، وبالتقاط الموجات المنعكسة عن سطح هذا العيب نستطيع تقدير عمقه حسب ما سبق . إلا أن الأجهزة المستعملة في هذه الطريقة لا تحتاج فيها إلى مثل هذه العمليات الحسابية

لكونها تعتمد على مبدأ القياسات النسبية ، إذ يكفي أن نتعرف على مبدأ عمل الجهاز ليساعدنا على فهم الطريقة التي يتم بها تحديد العمق النسبي للعيوب في حال وجوده •

يُبيّن الشكل (٣ - ١٨) رسماً تخطيطياً لطريقة استخدام الموجات فوق الصوتية للكشف عن العيوب في القطع المعدنية ، إذ نلاحظ من الشكل أن المولد (١) يقوم بإرسال نبضات كهربائية الى محول كهربائي ، وجود الرأس الباحث (٢) ، الذي يقوم بإرسال اهتزازات مرنة الى داخل القطعة عبر صفيحة من الكوارتز موجودة أيضا بالرأس الباحث وتشكل رأس الإرسال • وتصل هذه



الشكل (٣ - ١٨) : رسم تخطيطي لطريقة كشف العيوب في القطع المعدنية باستخدام الموجات فوق الصوتية .

- ١ - مولد نبضات كهربائية . ٢ - الرأس الباحث . ٣ - جهاز الاستقبال ؛
- ٤ - مولد ماسح . ٥ - جهاز التوقيت . ٦ - سماعة الاشعة المنبغية .

الاهتزازات المرنة الى السطح المقابل فتعكس عنه وترتد الى الرأس الباحث الذي يحول جزءاً من طاقة هذه الاهتزازات المنعكسة الى نبضات لها فرق كمون كهربائي ، حيث يقوم جهاز الاستقبال (3) بتقوية فرق كمون النبضات وإرساله الى صدام الاشعة المهبطية مما يؤدي الى انحراف شعاع الصمام بالاتجاه الشاقولي . وفي الوقت نفسه الذي يرسل فيه المولد اهتزازاته ، يقوم جهاز التوقيت بتشغيل المولد المناسب (5) الذي يحرف شعاع الصمام بالاتجاه الاقضي ، وبهذا الشكل تسجل الاشارة الابتدائية (A) المعبرة عن انعكاس الموجات فوق الصوتية عن السطح العلوي للقطعة المعدنية على يسار شاشة الصمام ، أما الاشارة (B) على يمين شاشة الصمام فتعبر عن انعكاس الموجات فوق الصوتية عن السطح السفلي للقطعة ، وتكون المسافة بين الاشارتين متناسبة مع سماكة القطعة . وعند وجود عيب داخل القطعة فان إشارة ثالثة سوف تظهر على الشاشة معبرة عن انعكاس الموجات عن سطح العيب ، وبذلك يكون بعد هذه الاشارة عن أي من الاشارتين السابقتين متناسباً مع بعد العيب عن كلٍ من سطحي القطعة (انظر الشكل ٣ - ١٨) .

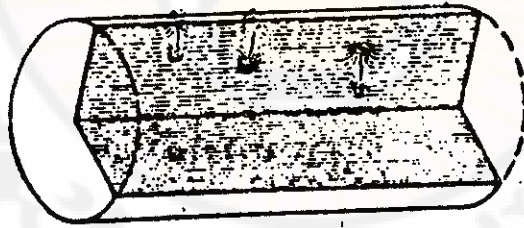
ونود أن ننوه الى أنه عند إجراء الاختبار فان الرأس الباحث لجهاز الكشف عن العيوب يتحرك بطول سطح القطعة ، ويكون هذا السطح مغطى بطبقة من الزيت .

٣ - ٤ - ٢ - الكشف عن العيوب باستخدام الطرق المغناطيسية :

تستخدم الطرق المغناطيسية للكشف عن العيوب السطحية في القطع المصنوعة من المعادن الفيرومغناطيسية أو خلائطها . والعيوب السطحية هي : الشقوق السطحية الناتجة عن معاملة المعدن بالجلخ أو السقاية أو الشقوق السطحية الناتجة عن وجود إجهادات سطحية كبيرة أو الدقائق اللامعدنية الموجودة بالقرب من السطح والمسماة الفصوص اللامعدنية .

وتعتمد هذه الطريقة على مبدأ تشتت الفيض المغناطيسي في القطع -

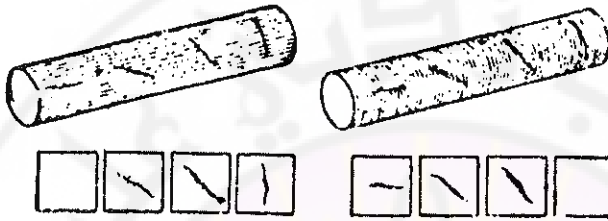
الفيرومغناطيسية وذلك في الاماكن التي توجد بها عوائق ذات نفاذية مغناطيسية منخفضة (كالشقوق والفصوص الالامعدنية وغيرها) . فاذا وضعنا قطعة فيرومغناطيسية (أو مغنطة) في ساحة مغناطيسية فانه نتيجة التحريض المغناطيسي ستحاول خطوط الساحة المغناطيسية ان تسير متوازية في داخل القطعة ، وإذا اعترض طريق هذه الخطوط بعض العوائق التي تجعل طريقها مقطوعا وغير مستمر (مثل وجود شق أو فجوة أو حبيبة لامعدنية) فان هذه الخطوط سوف تنحرف وتدور حول هذا العائق وتتابع طريقها من جديد ، الأمر الذي يؤدي الى تكاثف في خطوط الساحة المغناطيسية عند نهايتي العائق . وتستخدم لبيان ذلك على السطح برادة الحديد أو مسحوق اكسيد الحديد المغناطيسي (Fe_3O_4) المغطس في الزيت والذي يشكل مايسمى العالق-المغناطيسي . ولإظهار العيوب تُمغنط القطعة ثم يصب عليها العالق-المغناطيسي (أو تغطس القطعة في هذا العالق) فتترسب دقائق الاكسيد مشكلة خطوطاً متوازية ماعدا مكان العيب فانها تنحرف وتتكتف حول هذا المكان كما ذكرنا آنفاً (انظر الشكل ٣ - ١٩) .



الشكل (٣ - ١٩) : تكتف الخطوط المغناطيسية حول مكان العيب السطحي

ويجب أن ننوه هنا الى أن الشقوق المستقيمة والموازية لخطوط الساحة المغناطيسية لن تؤثر في سير هذه الخطوط وبالتالي فانها لن تكون مناطق لتجميع دقائق اكسيد الحديد المغناطيسي وتبقى هذه الشقوق غير مرئية ، لذلك ومن أجل

إجراء كشف للشقوق كافة الموجودة على السطح فانه لا بد من مغلطة القطعة على مرحلتين ومن اتجاهين مختلفين بحيث تصبح الشقوق غير المرئية في المرحلة الأولى مرئية في المرحلة الثانية (انظر الشكل ٣ - ٢٠) .



الشكل (٣ - ٢٠) : مغلطة القطعة على مرحلتين بهدف كشف الشقوق السطحية
مخلفة الاتجاهات

* * *

الفصل الرابع

تشكل البلورات المعدنية ونموها

اتضح لنا من دراستنا للفصل الأول من هذا الكتاب أن تجمد المعدن وتحوله من الحالة السائلة الى الحالة الصلبة يعني تبلوره وانتظام ذراته في أشكال هندسية منتظمة. ولكن يجب أن نعلم أن نوع النظام الذي تنتظم بموجبه الذرات أو بالأحرى شكل الهيكل الشبكي الذي يتبلور بموجبه هذا المعدن أو ذاك يحدده نصف قطر ذرة المعدن وتركيبها الإلكتروني وخواصها الفيزيائية الأخرى بما يتفق مع أفضل احتسالى لانتظام الذرات كي تكون القدرة الحرة في المجموعة أصغر ما يمكن وبالتالي لتكون المجموعة في الوضع الأقرب الى حالة التوازن .

إن حالة القدرة في مجموعة ما تتأثر بالإضافة لمخزون مكونات هذه المجموعة من القدرة بعوامل خارجية مثل الضغط ودرجة الحرارة . وكثيراً ما نلاحظ بالإضافة لتأثير هذه العوامل في توجيه عملية التحول من الحالة السائلة الى الحالة الصلبة أو بالعكس ، أنه بتغيير درجة الحرارة في الحالة الصلبة عند بعض المعادن يسكن أن يعيد المعدن تبلوه وتتحول هياكله الشبكية من شكل الى آخر أي يتحول من طور صلب الى طور صلب آخر وتسمى هذه الظاهرة التحول الألوטרوبي (Allotropic Transformation) ، وقد تعرفنا على هذه الظاهرة في الفصل السابق وسوف نتعرض لها بالتفصيل في نهاية هذا الفصل وذلك عند دراستنا للتغيرات في الحالة الصلبة لبعض المعادن ، ولكن ما يجب أن نعرفه الآن أن سائر

التحولات الطورية والالوتروبية هي تحولات قابلة للانعكاس وتتم في درجات حرارة ثابتة •

٤ - ١ - القدرة الحرة وتأثيرها في التحولات الطورية :

بيئنا سابقاً أن التحول من الحالة السائلة الى الصلبة يعني تشكل الهياكل الشبكية وبالتالي تشكل البلورات وتسمى هذه العملية التبلور وإن الموجه الرئيس في هذه العملية كما في غيرها من التحولات هو القدرة الحرة • وقبل أن نبدأ بالحديث عن القدرة الحرة وتأثيرها في عملية التبلور هذه لا بد من الاجابة عن التساؤل التالي وهو : لماذا تكون مجموعة ما عند درجات حرارة معينة في الحالة السائلة وعند درجات حرارة أخرى في الحالة الصلبة ولماذا يتم التحول من الحالة السائلة الى الصلبة (وبالعكس) عند درجات حرارة ثابتة ومحددة تماماً ؟

من المعروف أن جميع التحولات التي تحدث في الطبيعة بسا فيها الانصهار والتبلور تحدث لأن الحالة الجديدة للمادة (أو للمجموعة) وفي ظروف جديدة تكون أكثر استقراراً من الحالة السابقة وذلك من حيث القدرة - أي أنها تتمتع بقدرة مخزنة أقل • ولتفسير هذا الامر نأخذ المثال البسيط التالي : نلاحظ من الشكل (٤ - ١) أن الكرة تميل لأن تتدحرج من الوضع ١ الى الوضع ٢ الأكثر استقراراً ذلك لأن قدرتها الكامنة في الوضع ٢ أقل منها في الوضع ١ .

إن حالة القدرة في مجموعة ما تحتوي على عدد كبير من الذرات تحددها العلاقة الترموديناميكية التالية :

$$F = U - TS \quad (4.1)$$

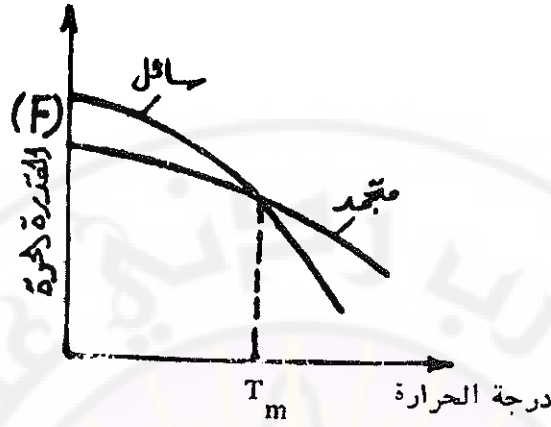


الشكل (٤ - ١)

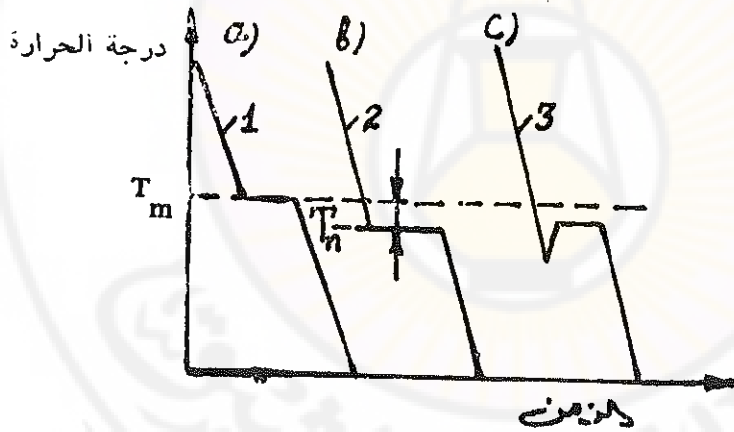
- F - القدرة الحرة للمجموعة .
- U - القدرة الداخلية أو القدرة المختزنة .
- T - درجة الحرارة المطلقة .
- S - الانتروبيا .

وهنا يمكننا القول أنه كلما ازدادت القدرة الحرة للمجموعة كانت المجموعة أقل استقراراً وإذا توافرت أمام هذه المجموعة إمكان للتحويل إلى حالة أخرى تكون قدرتها الحرة فيها أقل فإن المجموعة سوف تتحول مثلها في ذلك مثل الكرة في مثالنا السابق حيث يثبت أن الكرة يمكن أن تتدحرج من الوضع 1 إلى الوضع 2 إذا لم تعترض طريقها أية عوائق تمنعها من ذلك .

إذا تغيرت الظروف الخارجية المؤثرة في مجموعة (تغيرت درجة الحرارة مثلاً) فإن القدرة الحرة تتغير ، ويختلف مقدار هذا التغير بين الحالتين الصلبة والسائلة للمجموعة نفسها . ويبين الشكل (٤ - ٢) كيف تتغير القدرة الحرة للسائل والصلب بتغير درجة الحرارة . فمن الشكل نلاحظ أنه عند درجات الحرارة الأعلى من T_m تكون القدرة الحرة للمجموعة في حالتها السائلة أقل منها في حالتها الصلبة ، أما عند درجات الحرارة الأقل من T_m يكون العكس تماماً . لهذا فإن المجموعة عند درجات الحرارة الأعلى من T_m يجب أن تتواجد في حالتها



الشكل (٤ - ٢) : تغير القدرة الحرارية في حالتي السيولة والتجمد لمجموعة ما .
بتغير درجة حرارتها .



الشكل (٤ - ٣) : منحنيات تبريد المجموعة

السائلة وعند درجات الحرارة الأقل من T_m في حالتها الصلبة . وهنا يتضح لنا
أن القدرة الحرارية لحالتي السيولة والتجمد عند درجة الحرارة T_m تكون واحدة
(أي متساوية) وهذا يعني أن المعدن موجود في حالة توازن ، وتسمى درجة

الحرارة هذه درجة حرارة التوازن أو درجة حرارة التبلور النظرية • لكن عملية التبلور لا يسكن ان تحدث عند درجة الحرارة T_m ذلك لان : $F_{liq} = F_{solid}$ وحتى يبدأ التبلور يجب أن تتوافر القوة المحركة لعملية التبلور هذه ، ويعتقد ان القدرة الحرة للسجسوة مثابة القوة المحركة اللازمة لها للتحويل الى الحالة الصلبة فمن منحنيات التبريد الموضحة على الشكل (٤ - ٣) نرى أن هذا ممكن فقط عندما يكون السائل مبرداً إلى درجة حرار أقل من T_m ، وعندها تسمى درجة الحرارة التي يبدأ عندها التبلور عملياً درجة حرارة التبلور الحقيقية ، ويدعى تبريد السائل الى درجة حرارة أقل من درجة حرارة التوازن التبريد المفرط (أو فرط التبريد) •

ونود هنا أن ننوه إلى أن كل ما ذكرنا آنفاً عن ظاهرة التبريد والتبلور والتبريد المفرط ينطبق على ظاهرة التحول الماكس من الحالة الصلبة الى السائلة . فهذا التحول لا يحدث إلا عند درجة حرارة أعلى من T_m وتسمى هذه الظاهرة بالتسخين الزائد (أو فرط التسخين) •

يساوي مقدار فرط التبريد عادة الفرق بين درجتي حرارة التبلور النظرية والحقيقية للمعدن نفسه • فمثلاً إذا علمنا أن درجة حرارة التبلور النظرية لمعدن الاتيسوان (Sb) تساوي 631°C ولزمنا حتى يبدأ مصهور الاتيسوان النقي بالتبلور أن نبرده حتى درجة الحرارة 590°C ووجدنا أنه عند هذه الدرجة من الحرارة يتبلور المصهور بكامله فان مقدار فرط التبريد يحدد بالفرق :

$$n = 631 - 590 = 41^{\circ}\text{C}$$

يمكننا تمثيل تبريد المعدن المنصهر وتحوله من الحالة السائلة الى الصلبة بياناً من خلال المنحنيات المبينة على الشكل (٤ - ٣) حيث محاور إحداثياتها

درجة الحرارة - الزمن . ومن هذه المنحنيات نلاحظ أن تبريد المعدن وهو لا يزال في حالته المنصهرة يسبب انخفاضاً انسيابياً في منحني التبريد ولا يرافق هذا التبريد أي تغير نوعي في حالة المعدن . ولكن عندما نصل بالتبريد إلى درجة حرارة التبلور تظهر العتبة الأفقية على منحني التبريد والتي تعني ثبات درجة الحرارة عند التبلور وسبب ذلك هو أن الحرارة المنطلقة من المعدن أثناء تبلوره تعوض ما يفقده بتبريده خلال هذه الفترة . وبعد أن يتم التحول الكامل إلى الحالة الصلبة تبدأ الحرارة من جديد بالانخفاض وهذا يعني أن الجسم الصلب أخذ يبرد .

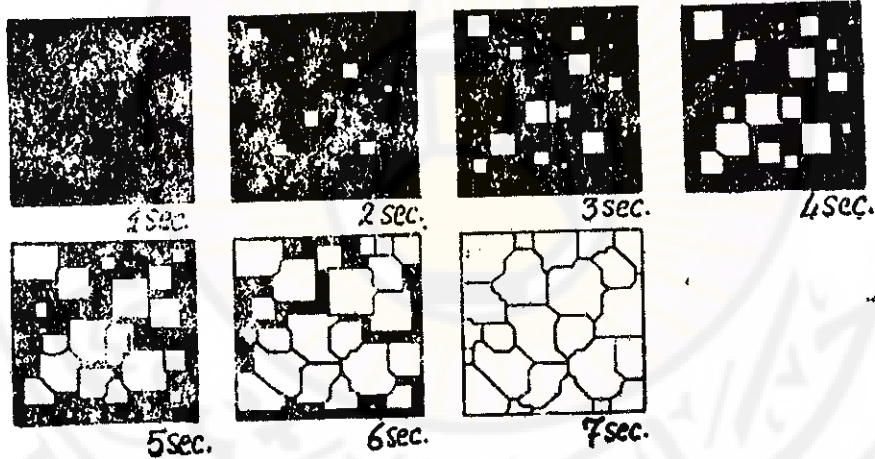
يُبين الشكل (٤ - ٣ a) منحني التبلور النظري للمعدن ، أما الشكل (٤ - ٣ b) فيبين منحني التبلور الحقيقي . ومنه نلاحظ أن المشهور المعدني يبرد باستمرار حتى درجة حرارة التبريد المفروطة T_n والتي تقع تحت درجة حرارة التبلور النظرية T_m . إذ عند هذه الدرجة من الحرارة تتوافر القوة المحركة لعملية التبلور كما ذكرنا آنفاً .

ونود أن نذوّه في نهاية هذا البند إلى أن انطلاق الحرارة أثناء تبلور بعض المعادن يحدث في اللحظة الأولى للتبلور وبشدة مما يسبب ارتفاع درجة الحرارة وبشكل مفاجئ لتقترب من درجة حرارة التبلور النظرية (انظر المنحني c على الشكل ٤ - ٣) . فهكذا يتبلور معدن الاتيموان مثلاً ، أما باقي المعادن فإن مقدار هبوط التبريد عند التبلور يكون صغيراً لدرجة أنه لا يمكن تحديده في الشروط العادية للتجربة .

٤-٢ - ميكانيزم التبلور :

تتم عملية التبلور في مرحلتين أساسيتين : الأولى هي تشكل بلورات صغيرة

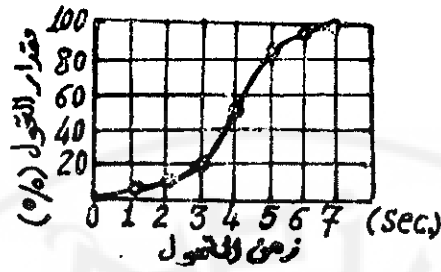
جدا وناعمة تسمى عادة بذور التبلور (أو مراكز التبلور) ، والثانية هي نمو هذه البذور وتحولها إلى بلورات . ويبين الشكل (٤ - ٤) نموذجا مبسطا لعملية تبلور تتم وفق هاتين الظاهرتين . فمن الشكل يتضح أنه افترض على المساحة الميينة تشكل خمس بذور تبلور كل ثانية وان هذه البذور تنمو بسرعة محددة . ففي نهاية الثانية الاولى تظهر خمس بذور تبلور ، وفي نهاية الثانية الاخرى تنمو هذه البذور الخمس ويتشكل في الوقت نفسه خمس بذور أخرى جديدة ، وهكذا وباستمرار تشكل بذور التبلور ونموها تتم عملية التبلور . وكما يبدو من الشكل فان تبلور النموذج ينتهي في حالتنا هذه في نهاية الثانية السابعة . ولقد تبين تجريبيا أن المخطط النوعي المبين على الشكل (٤ - ٤) يمكن أن يتحول إلى مخطط كمي كما في الشكل (٤ - ٥) الذي يبين علاقة مقدار التحول (أو



الشكل (٤ - ٤) : نموذج مبسط لعملية التبلور .

مستوى التحول) من الحالة السائلة الى الصلبة بزمان التحول مقدراً بالثانية ، ويدعى هذا النوع من المخططات بمخطط التبلور الكمي .

تسمح دراسة مثل هذه المخططات باستخلاص استنتاجين هامين :



الشكل (٤ - ٥) : منحنى التبلور الكمي.

١ - إن استمرار عملية التبلور يعني أن عدد البلورات المشكلة يزداد باستمرار ويستمر بالنمو حتى تأتي اللحظة التي يحدث فيها التقاء البلورات المتنامية مع بعضها ، عندها تبدأ هذه البلورات بإعاقة نمو بعضها لبعضها الآخر ويتباطأ بالتالي نموها ، ويساعد على ذلك أن كمية السائل (الذي تشكل منه بلورات جديدة) تصبح قليلة .

٢ - تتمتع البلورة المعدنية بشكل منتظم مادامت محاطة بالسائل ، ولكن عندما يتم التقاء البلورات ببعضها بعضا يتوقف نمو البلورة باتجاه أو أكثر بينما يستمر في الاتجاهات الأخرى ، ولهذا تصبح السطوح الفاصلة بين البلورات ذات أشكال فوضوية غير منتظمة . لذلك فإن عملية التبلور تتحدد بالواحدتين التاليتين :

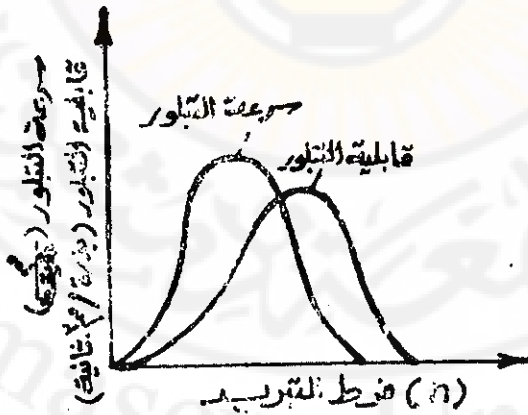
أ - سرعة تشكل بذور التبلور وتسمى عادة قابلية التبلور وهي عدد البذور المشكلة في واحدة الحجم في واحدة الزمن ($\frac{\text{بذرة}}{\text{مم}^3 \cdot \text{ثانية}}$) .

ب - سرعة نمو البلورات وتسمى عادة سرعة التبلور وهي سرعة ازدياد أبعاد البلورة في واحدة الزمن ($\frac{\text{سم}}{\text{ثانية}}$ أو $\frac{\text{مم}}{\text{ثانية}}$ أو $\frac{\text{مم}}{\text{دقيقة}}$) .

لقد تبين أن كلاً من قابلية التبلور وسرعة التبلور تتعلقان بمقدار فرط التبريد n : ويبين الشكل (٤ - ٦) هذه العلاقة بيانياً . فمن الشكل نلاحظ أنه عندما تكون ($n = 0$) فإن كلاً من قابلية التبلور وسرعة التبلور تساويان الصفر وهذا يعني أن التبلور لن يحدث مما يتفق مع ما ذكر آنفاً عن ضرورة تحقيق التبريد المفرط لحدوث التبلور . وبازدياد مقدار فرط التبريد تزداد قيم كل من قابلية التبلور وسرعة التبلور وتصل إلى قيمة عظمى ثم تبدأ بالانخفاض لتصل إلى الصفر عندما تكون قيمة فرط التبريد كبيرة جداً .

إن ازدياد كل من قابلية التبلور وسرعة التبلور من أجل مقادير فرط تبريد قليلة يعني أنه بالقرب من درجة حرارة التوازن T_m تكون حركة السائل كبيرة والسبب في أن التبلور يتسارع بازدياد مقادير فرط التبريد راجع إلى ازدياد الفارق بين قيم القدرة الحرة لكل من السائل والمتجمد .

وأما انخفاض قيم كل من قابلية التبلور وسرعة التبلور من أجل مقادير فرط تبريد كبيرة فراجع إلى أن حركة الذرات تنخفض عند درجات الحرارة التي تكون



الشكل (٤ - ٦) : علاقة كل من قابلية التبلور وسرعة التبلور بمقدار فرط التبريد

أقل بكثير من درجة الحرارة T_m وبالتالي تنخفض مقدرة المجموعة على التحول
وبمعنى آخر تصبح حركة الذرات غير كافية لكي يتم انتقالها من الوضع الفوضوي
في السائل الى الوضع الصحيح والمنتظم في عقد الهياكل الشبكية .

تتعلق أبعاد البلورات المتشكلة بالنسبة بين قيم قابلية التبلور وسرعة التبلور .
فعندما تكون قيم سرعة التبلور كبيرة وقابلية التبلور صغيرة (أي عندما تكون
مقادير فرط التبريد قليلة - انظر الشكل ٤ - ٦) فان عدد البلورات المتشكلة
محدود والبلورات كبيرة الحجم . أما عندما تكون قيم سرعة التبلور صغيرة
وقابلية التبلور كبيرة فان عدد البلورات المتشكلة كبير والبلورات صغيرة وناعمة .

ولابد أن ننوه هنا إلى انه طبقاً للشكل (٤ - ٦) فانه إذا أمكن تبريد السائل
إلى درجة حرارة أقل بكثير من درجة حرارة تبلوره فان سرعة التبلور وقابلية التبلور
تصبحان مساويتين الصفر وهذا يعني أن السائل لن يتبلور ، وهذا الامر في مصهور
المعادن لا يحصل عادة ذلك لان المعادن المصهورة قليلة الميول للتبريد المفرط . أما
الأملاح والسياليكات والمواضع العضوية فهي على العكس شديدة الميول للتبريد
المفرط ، فالزجاج مثلاً يسيل للتبريد المفرط ويتواجد في الحالة العجينية ضمن مجال
حراري كبير ويتميز بعدم وجود درجة حرارة معينة لتجمده (أو انصهاره) ،
وتعد حالته هذه الحالة الامورفية والتي تتميز بعدم وجود توضع منتظم للذرات
على شكل هياكل شبكية محددة .

٤ - ٣ - تشكل بذور التلور :

إن التحول من طور إلى آخر والذي رأينا أن القدرة الحرة تلعب فيه الدور
الاساسي ، لا يتم في أجزاء المادة كافة دفعة واحدة ، وانما يبدأ في نقاط مختلفة،

وفي فترة التحول يكون الطوران (المتحول والناتج) موجودين جنباً إلى جنب والجزئيات الصغيرة التي تنشأ من الطور الجديد المتشكل أسمىناها بذور التبلور وقلنا أن نشوء هذه البذور يتطلب تغيرات داخلية في انتظام الذرات يرافقها تغير في الخواص الفيزيائية لهذه البذور . فلو افترضنا أن كلا من هذه البذور هو كرة صغيرة تحتوي على عدد محدود من الذرات ونصف قطرها (r) فإن فارق القدرة الحرة الذي يساعد على تشكل هذه البذور هو مجموع فوارق القدرة الحرة للتغيرين الداخليين التاليين :

أ - إن تشكل بذرة التبلور يرافقه تغير في القدرة الحرة يتعلق بمقداره بحجم هذه البذرة وهذا المقدار سالب ويساوي (- V Δ F) .

ب - إن تشكل البذرة واستقلالها بسطح خاص يفصلها عن الطور السابق يحتاج إلى مقدار من القدرة لتكوين التوتر السطحي لهذه البذرة ، وهذا المقدار موجب ويساوي (S σ) .

وعليه فإن فارق القدرة الحرة الكلي يساوي :

$$\Delta \Phi = S \sigma - V \Delta F \quad (4.2)$$

حيث : S - مساحة سطح بذرة التبلور .

σ - التوتر السطحي .

V - حجم بذرة التبلور .

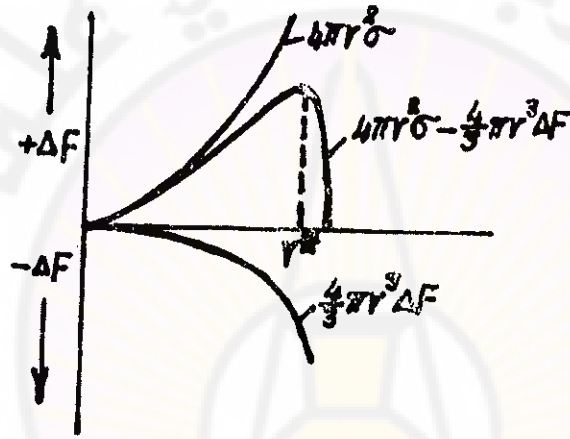
ΔF - فارق القدرة الحرة في واحدة الحجم بين الطورين السائل والصلب .

وبافتراض بذرة التبلور على شكل كرة فإن العلاقة (4.2) تصبح على

الشكل :

$$\Delta \Phi = 4 \pi r^2 \sigma - \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta F \quad (4.3)$$

تبين هذه العلاقات أن تغير القدرة الحرة هو مجموع جبري لمقدارين يتعاق كل منهما بنصف قطر بذرة التبلور وأحد هذين المقدارين سالب والآخر موجب وهذا يعني أن بذرة التبلور لن تتشكل إلا إذا كان المقدار السالب مساويا في قيمته المطلقة المقدار الموجب أو أكبر منه لكي يكون تغير القدرة الحرة باتجاه التناقص • ويبين الشكل (٧-٤) علاقة ΔF بنصف قطر بذرة التبلور •



الشكل (٧-٤) : علاقة تغير القدرة الحرة بنصف قطر بذرة التبلور

ويتضح من الشكل أنه عندما يكون r صغيرا فإن تغير القدرة الحرة يكون موجبا وهذا يعيق تشكل طور جديد • أما إذا أصبح r مساويا القيمة الحدية لنصف قطر بذرة التبلور ($r \geq r^*$) أو أكبر منها فإن القدرة الحرة تبدأ بالتناقص وتشكل بذرة التبلور يمكن أن يتم • أما قيم r^* فيمكن إيجادها بعد جعل تفاضل العلاقة (4.3) بالنسبة لـ (r) مساويا للصفر •

$$\frac{d \Delta F}{dr} = 8 \pi r \sigma - 4 \pi r^2 \Delta F = 0 \quad (4.4)$$

ومنه :

$$r^* = \frac{2 \sigma}{\Delta F} \quad (4.5)$$

وهكذا فإن نمو بذرة التبلور لا يبدأ إلا عندما تكون هذه البذرة مستقرة أي عندما يجتمع عدد من الذرات حسب الظروف الجديدة لتكوين بذرة من الطور البلوري. نصف قطرها أكبر من r^* أما البذور الأصغر من ذلك فإنها لا تلبث أن تذوب في السائل •

نهاية الحديث عن بذور التبلور لا بد من التنويه إلى ما يلي :

١- بذور التبلور ثلاثة أنواع هي :

أ - بذور ناتجة عن التبريد ولقد تعرفنا على طبيعة تشكل هذا النوع من البذور وظروفه بالتفصيل في هذا البند •

ب - بقايا الهياكل الشبكية : إذا صهرنا معدنا ما ولم تتمدّد في رفع درجة حرارته أي أبقيناه فوق درجة الانصهار بقليل فإن بعض الهياكل البلورية تبقى محفوظة على انتظامها أي بدون ذوبان في المحلول وعند التبريد تكون هذه البقايا مراكز تبلور إضافية •

ج - البذور الغريبة : كالشوائب والذرات المعدنية الغريبة التي لا تذوب في المعدن المنصهر والتي تكون عند التبريد مثابة بذور يبدأ حولها التبلور •

٢- لكل درجة حرارة تبلور (أي لكل مقدار من فرط التبريد n) يوجد نصف قطر معين r^* للبذرة المستقرة • وكلما انخفضت درجة الحرارة (أي كلما زاد مقدار فرط التبريد) كان نصف قطر البذرة المستقرة أصغر وكلما ازداد عدد مراكز التبلور المتشكلة في واحدة الزمن جرت عملية التبلور بسرعة أكبر •

٣- لا يقتصر تشكل بذور التبلور ونموها على التحول من الحالة السائلة إلى الصلبة فحسب وإنما يتعداها إلى التحولات التي تحدث في الحالة الصلبة • فتحول طور صلب إلى طور صلب آخر يتم أيضا عن طريق تشكل بذور تبلور

جديدة ونسوها وتسمى هذه العملية إعادة التبلور . وتتعلق سرعة إنجاز هذه العملية بمقدار فرط التبريد حيث أن إعادة التبلور يمكن أن تحدث من أجل مقادير كبيرة لفرط التبريد ، وهذا يعني أن كلا من قابلية التبلور وسرعة التبلور تجد مكانها في هذه الحالة أكثر من حالة التبلور الاولي من السائل .

٤ - ٤ - أشكال نمو البلورات :

تخضع عملية التبلور الحقيقية للمصهور المعدني لمجموعة مختلفة من العوامل ذات التأثير المميز في مجرى هذه العملية لدرجة أن دور مقدار فرط التبريد الذي تحدثنا عنه آنفاً يأتي في المرتبة الثانية بعد هذه العوامل . ومن العوامل التي تلعب دوراً أساسياً في التأثير في سير عملية التبلور الحقيقية وتباين أشكال البلورات الناتجة نذكر :

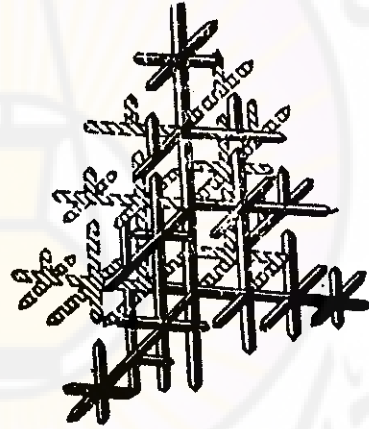
سرعة الحرارة المنطلقة من السائل واتجاهها ، وجود جزيئات لم تذب في السائل تشكل مراكز تبلور إضافية كما ذكرنا سابقاً ، وجود تيارات إعصارية في المصهور المعدني وغيرها .

وتبعاً لهذه العوامل فإن نمو البلورات يمكن أن يتم بأحد ثلاثة أشكال هي :

١ - البلورات متعددة السطوح : وتنمو هذه البلورات بأشكال منتظمة وسطوح متعددة كتبلور الملح من محلول ملحي وهذا التبلور نادر جداً في حالة المعادن ويحصل أحياناً في حالة السبائك المعدنية وذلك عندما تكون نسبة العنصر المذاب أقل بكثير من نسبة العنصر المذيب .

٢ - البلورات العنصرية (الاندريتية) : يتم نمو أكثر البلورات المعدنية بهذا الشكل . فلقد تبين لنا أن نمو البلورة المعدنية في لحظة معينة يختلف

من اتجاه الى آخر داخل السائل ، فمن الملاحظ أن البلورة تبدأ بالنمو عادة على شكل الابر وحرارة الانصهار المنطلقة من هذه الابر تزيد من درجة حرارة المعدن المنصهر المحيط بها فتصبح سرعة التبلور حولها مساوية الصفر ، وبما أن المحلول في حركة دائمة فقد تصل بعض الذرات التي درجة حرارتها مناسبة للتجيد أي للترسب على هذه الابر إلى أجزاء مختلفة من الابر فتبدأ عندها هذه الابر بالتشعب على شكل يشبه ورقة الصنوبر حتى يلتقي بعض هذه الاوراق ببعضها الآخر ويزداد عرض هذه الابر حتى تسلا الفراغ الكائن بينها • وبين الشكل (٨ - ٤) رسماً تخطيطياً للبلورة الفضية ، بينما بين الشكل (٩ - ٤) بلورات فضية على سطح مصبوبة من الرصاص •



الشكل (٩ - ٤) : بلورات فضية على سطح مصبوبة من الرصاص

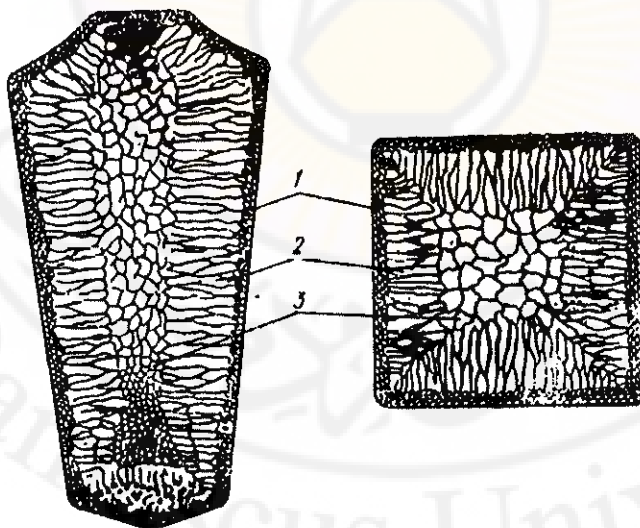
الشكل (٨ - ٤) : نمو البلورة الفضية

٣ - البلورات الكروية : وهي البلورات التي تبدأ بالنمو على شكل كرات صغيرة ، وعلى الرغم من ازدياد حجمها مع استمرار التبريد فانها تبقى محافظة على شكلها حتى يلتقي بعضها ببعض • ويتبلور بهذا الشكل الكربون الموجود في حديد الصب وذلك عندما يتواجد معه في الخليطة نفسها بعض المعادن التي تساعد على تبلوره بهذا الشكل مثل المنغنيز او الكالسيوم •

وهنا لابد لنا من التعرض لبنية مصبوبة ما واتكن مصبوبة فولاذية في قالب معدني بغية التعرف عن كثر على طبيعة نمو البلورات وظروفها وأشكالها والعوامل المؤثرة في ذلك • فلقد بينا سابقا أن عملية التبلور الحقيقية تخضع بصفة عامة لمجموعة من العوامل • فإذا اجتمعت هذه العوامل الجانبية مع القوانين العامة للتبلور فإنها تحدد بنية المصبوبة • وعلى هذا الأساس تتألف بنية المصبوبة الفولاذية من ثلاث مناطق رئيسة (انظر الشكل ٤ - ١٠) :

أ - المنطقة الاولى : وهي القشرة الخارجية ذات البنية الحبيبية الناعمة ، وتتشكل هذه الحبيبات الناعمة بسبب تلامس سطح السائل مع الجدار الداخلي للقالب مما يؤدي الى وجود تدرج حراري كبير في هذه المنطقة، وتأخذ ظاهرة التبريد المفرط دورها هنا مما يسبب تشكل عدد كبير جدا من بذور التبلور وبالتالي تكون البنية ناعمة •

ب - المنطقة الثانية : وهي بلورات متطاولة • فبعد أن تشكل القشرة



الشكل (٤ - ١٠ : بنية المصبوبة الفولاذية

الخارجية ذات البنية الحبيبية الناعمة تتغير ظروف انطلاق الحرارة من السائل، إذ يبدى جدار القالب مقامة لانتقال الحرارة عبره وذلك بسبب ارتفاع درجة حرارته . ولهذا ينخفض مقدار التدرج الحراري في طبقة السائل المجاورة وبالتالي ينخفض مقدار فرط التبريد . ونتيجة لذلك يبدأ عدد محدود من مراكز التبلور بالنمو عموديا على سطح القشرة المعدنية المتشكلة (أي باتجاه انطلاق الحرارة) وتسمى البلورات المعدنية المتشكلة البلورات المتطاولة .

ج - المنطقة الثالثة : وتحتوي على بلورات متوازنة (منتظمة تقريبا) . ففي مركز المصبوبة لم يعد يوجد اتجاه محدد لانطلاق الحرارة وتصبح درجة حرارة السائل المتبقي متساوية في جميع نفاذه تقريبا . ولهذا تنمو البلورات باتجاهات مختلفة حتى يلتقي بعضها ببعضها الاخر ويتشكل نتيجة لذلك بلورات شبه منتظمة نمت بالاتجاهات الثلاثة بشكل متساوٍ تقريبا . أما مراكز التبلور في هذه المنطقة فهي إما دقائق صغيرة موجودة أصلا في الفولاذ السائل أو وقعت فيه بشكل عنوي أو شوائب لم تذوب في هذا السائل (أي مركبات صعبة الانصهار) .

٤ - ٥ - التغيرات في الحالة الصلبة (التحولات اللوتريكية) :

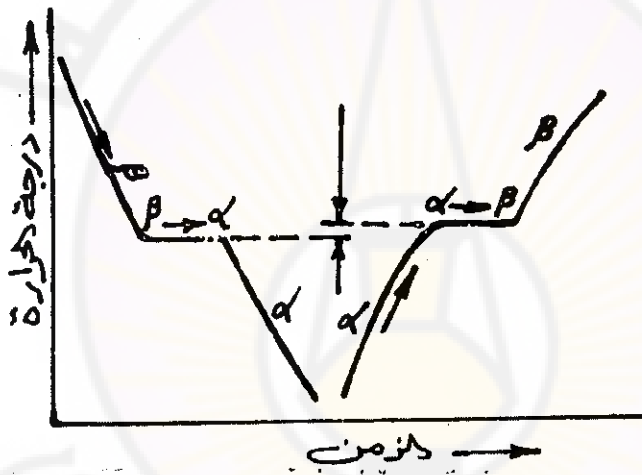
يسكن في بعض الحالات وعند تغير درجة الحرارة أو الضغط أن يصبح للمعدن نفسه هيكل شبكي آخر أكثر استقرارا من ذلك الهيكل الذي كان عند درجات حرارة أخرى أو ضغط آخر . فالحديد يسكن أن تكون هيكله الشبكية على شكل مكعبات متسركزة حجماً أو وجهياً وذلك تبعاً لتغير أحد العاملين آنفي الذكر . وكذلك الكوبالت تكون على شكل مكعبات متسركزة وجهياً أو مواشير سداسية . وما قبل ينطبق على كل من القصدير والمنغنيز والتيتانيوم وبعض المعادن الاخرى . ولقد بحثنا في بداية هذا الفصل والفصل السابق في تعريف ظاهرة التحول

الآلوتروبي وبيننا من خلال هذا التعريف أن بعض المعادن عندما تتغير حرارتها وهي في الحالة الصلبة تعيد تبلورها وتتحول الهياكل الشبكية من شكل الى آخر أي يحدث التحول من طور صلب إلى طور صلب آخر . ويدعى هذا التحول بالتحول الآلوتروبي ذلك لأنه ناتج عن تغير في درجة الحرارة كما أسلفنا . أما تغير الضغط الخارجي على المعدن فانه يسكن ان يحدث التحول الآلوتروبي نفسه في المعدن ، ولكن ذلك يتطلب ضغوطا عالية جدا والتي لا يمكن تحقيقها عمليا في أغلب الأحيان ، لهذا يكتفى عادة بدراسة التحول الآلوتروبي الحراري .

يبين الجدول (٤ - ١) المجالات الحرارية التي تتواجد فيها الاشكال الآلوتروبية لبعض المعادن التي تتمتع بأهمية بالغة في الصناعة . ومن هذا الجدول نلاحظ انه يرمز للاشكال الآلوتروبية بالحروف اليونانية α و β و γ وغيرها، حيث يوضع الحرف اليوناني بجانب رمز المعدن ، ولقد جرت العادة أن يستعمل الرمز α للشكل الآلوتروبي في درجات الحرارة الاخفض للمعدن ثم يليه الرمز β عند درجات حرارة أعلى ثم الرمز γ وهكذا . و يترافق تحول الهيكل الشبكي للمعدن النقي من شكل إلى آخر عند تسخينه بامتصاص حرارة من قبل المعدن ولفترة زمنية معينة قد تطول هذه الفترة أو تقصر حسب طبيعة المعدن، ولهذا يلاحظ ثبات في درجة الحرارة عند حدوث هذا التحول ، ويظهر ذلك على شكل عتبة أفقية على منحنى التسخين (أي المنحنى الذي يبين علاقة درجة الحرارة بزمان التسخين - انظر الشكل ٤ - ١١) . أما عند التبريد فانه يحدث انطلاق حرارة نظريا عند درجة الحرارة نفسها التي حدث عندها التحول أثناء التسخين ولكن عمليا يتم عند درجة حرارة أخفض وذلك بسبب وجود ظاهرة فرط التبريد في هذه الحالة أيضاً .

تسمى درجة الحرارة التي يتم عندها تحول الهيكل الشبكي من شكل إلى آخر درجة حرارة التحول الآلوتروبي . وعلى هذا الاساس يتمتع الحديد

النقي بدرجتي حرارة للتحويل الآلوتروبي ، هما 911°C و 1392°C وتشكل الاشكال الآلوتروبية الجديدة نتيجة ظهور مراكز تبلور ونمو هذه المراكز وتحولها إلى بلورات مثلها في ذلك مثل التبلور من الحالة السائلة ، وتتمتع المنحنيات التي تربط ما بين كل من قابلية التبلور وسرعة التبلور في هذه الحالة أيضا ومقدار فرط التبريد للتحويل الآلوتروبي بالشكل نفسه الذي رأيناه للتبلور من المحلول السائل . ونود هنا أن نتوه إلى أن التحولات الآلوتروبية في الحالة الصلبة تتمتع بميل كبير لفرط التبريد وأكثر منه في حالة التحول من سائل إلى صلب .



الشكل (٤ - ١١) : منحنيات التبريد والتسخين لمعدن يتمتع بتحول آلوتروبي .

يتميز كل معدن يتحول آلوتروبيا عن غيره بدرجات حرارة التحول وطبيعة هذا التحول ، وليان ذلك نأخذ كمثال التحولات التي تحدث عند كل من معدني القصدير والحديد :

٢ - يُسمى القصدير الذي درجة حرارته أعلى من 18°C القصدير الأبيض والقصدير الذي درجة حرارته أقل من هذه الدرجة القصدير الرمادي . ويكون

الجدول (٤ - ١) : الحالات الذرية التي تواجد فيها الاشكال الالوترونية لبعض المعادن

رمز المعدن	رمز الشكل الالوتروني	المجال الحراري الذي يتواجد فيه بحالة مستقرة	نوع الهيكل الشبكي (رقم احداثياته)
Fe	α	أقل من 911 °C 1392 ÷ 1539	مكعب متركز حجمياً (8)
	γ	911 ÷ 1392	مكعب متمركز وجيماً (12)
	δ	أقل من 450 °C	موشور سداسي منتظم (12)
Co	β	450 ÷ 1480	مكعب متمركز وجيماً (12)
	α	أقل من 18 °C	هرم ثلاثي كذا في الماس (4) *
Sn	β	18 ÷ 232	رباعي منفرج حجمياً (6)

مكعب متعدد الذرات ومقعد التركيب	أقل من 700 °C	α	Mn
مكعب متعدد الذرات ومقعد التركيب	700 ÷ 1079	β	
رباعي متمركز وجنبا	1079 ÷ 1143	γ	
رباعي متمركز وجنبا (8)	1143 ÷ 1244	δ	
موشور سداسي منتظم (12)	أقل من 882 °C	α	Ti
موشور سداسي متمركز وجنبا (8)	882 ÷ 1660	β	
موشور سداسي منتظم (12)	أقل من 867 °C	α	Zr
مكعب متمركز وجنبا (8)	867 ÷ 1860	β	
موشور معيني	أقل من 668 °C	α	U
رباعي	668 ÷ 720	β	
مكعب متمركز وجنبا (8)	720 ÷ 1132	γ	

* - مكعب متمركز وجنبا توضع فيه أربع ذرات إضافية بحيث تشكل كل أربع ذرات متجاورة هرمًا ثلاثيًا .

الهيكل الشبكي للقصدير الأبيض على شكل رباعي رقم أحداثياته (6)، ويتحول هذا الرباعي تحت الدرجة 18°C إلى هرم ثلاثي كما في الماس رقم أحداثياته (4)، ونسبة ملء الفراغ في الأول أكثر بسرة ونصف المرة منها في الثاني. ويترافق تحول القصدير الأبيض إلى رمادي بازدياد في الحجم يصل تقريباً إلى ٢٥٪. والقصدير الرمادي مسحوق رمادي لا يستمتع بالخواص المعدنية المعروفة. وعلى الرغم من أن درجة حرارة التحول الأوتروبي من $\text{Sn}_{(\beta)}$ إلى $\text{Sn}_{(\alpha)}$ هي 18°C ، إلا أن هذا التحول عند هذه الدرجة من الحرارة (وحتى أقل من ذلك) يتم بسرعة بطيئة جداً، ونحصل على قيم كبيرة نسبياً لسرعة نمو البلورات (أي سرعة إعادة التبلور) عندما يكون مقدار فرط التبريد مساوياً 50°C أي أن التحول يتم عند درجة الحرارة ($32^{\circ}\text{C} -$) فعند هذه الدرجة من الحرارة تكون سرعة نمو البلورات مساوية 0.004 مم في الساعة. ونظراً لأن سرعة تحول القصدير $\text{Sn}_{(\beta)}$ بطيئة جداً فإنه يميل بشكل كبير إلى التبريد المفرط ويمكن أن يحافظ على هيكله الشبكية دون تحول إلى $\text{Sn}_{(\alpha)}$ لفترة زمنية طويلة نسبياً عند درجات الحرارة التي أقل من 18°C .

ب - يكتشف أن معدن الحديد عند درجات الحرارة التي تقل عن 911°C يكون على شكل مكعبات متمركزة وسطياً، وعند تسخينه إلى درجة الحرارة 911°C يتحول إلى مكعب متمركز وجهياً Fe_{γ} والذي لا يلبث عند درجة الحرارة 1392°C أن يتحول إلى مكعبات متمركزة حجماً مرة أخرى Fe_{α} (انظر الشكل ٣ - ١٢ في الفصل الثالث). ولهذا نرى أن المكعب المتمركز حجماً للحديد مستقر في مجالين حرارين. ويترافق التحول من $\gamma \leftarrow \alpha$ بانخفاض في رقم الأحداثيات وانخفاض أيضاً في نسبة ملء الفراغ (البند ١ - ٥ من الفصل الأول) ولولم

يترافق انخفاض نسبة ملء الفراغ بنقصان نصف قطر الذرة لحصل ازدياد في حجم الهيكل الشبكي عند التحول من γ الى α بمقدار 50% ، لذا ونظراً لنقصان نصف قطر الذرة فإن ازدياد حجم الهيكل الشبكي يكون بمقدار 1% فقط . ولا بد أن ننوه الى أن الاجهادات الناتجة عن إعادة التبلور هذه وعلى الرغم من الازدياد غير الكبير في الحجم فإن لها أهمية بالغة .

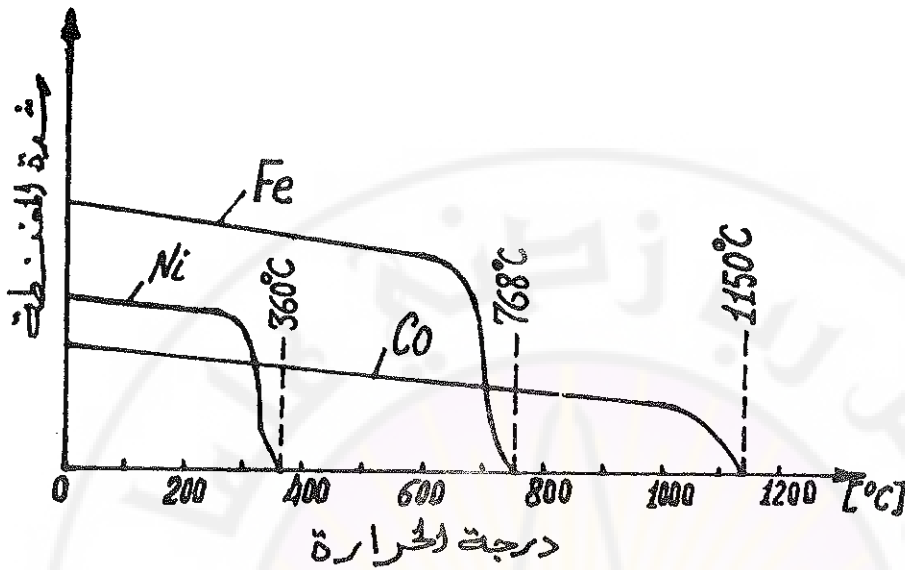
٤-٦ - التغيرات المغناطيسية :

تتمتع بعض المعادن مثل الحديد والكوبالت والنيكل بخواص مغناطيسية مميزة تكسب في القابلية الجيدة للتمغنط عند هذه المعادن ، وتدعى هذه الخواص المغناطيسية بالخواص الفيرومغناطيسية . وتفقد هذه المعادن خواصها الفيرومغناطيسية بالتدرج أثناء التسخين إلى أن تصل درجة حرارتها إلى درجة حرارة معينة عندها تفقد خواصها الفيرومغناطيسية بشكل كامل ، وتدعى درجة الحرارة هذه بنقطة كيوري نسبة للعالم الذي اكتشفها . ويبين الشكل (٤ - ١٢) كيف تنخفض شدة المغنطة عند المعادن آتفة الذكر بارتفاع درجة حرارتها وأما نقطة كيوري فتتطابق الفقدان النهائي لهذه (أي للخواص الفيرومغناطيسية) .

يتمتع التغير المغناطيسي بمجموعة من الخواص تميزه عن التغيرات الآلوتروبية نوردتها فيما يلي :

١ - تتغير الخواص الفيرومغناطيسية بالتدرج كلما اقتربنا من نقطة كيوري ، لذا لا تعد هذه النقطة بدرجة الحرارة التي يحدث عندها التغير المفاجيء في هذه الخواص كما هو الحال في التغيرات الآلوتروبية .

٢ - لا يتمتع التغير المغناطيسي بتخلف حراري ولا يؤدي ازدياد سرعة التبريد للمعدن إلى انخفاض درجة الحرارة التي يحدث عندها التغير .



الشكل (٤ - ١٢) . علاقة الخواص المغناطيسية لكل من الحديد والنيكل والكوبالت بدرجة الحرارة .

٣ - لا يسبب التغير المغناطيسي تغيراً في الخواص الميكانيكية وفي بعض الخواص الفيزيائية بينما هناك خواص فيزيائية أخرى تتأثر بهذا التغير مثل الخواص المغناطيسية والحرارية والكهربائية .

٤ - إن أهم ما يميز التغير المغناطيسي عن التغير الآلوتروبي هو أن الأول لا يترافق بإعادة تبلور المعدن (أي وجود مراكز تبلور جديدة وحدوث تغير في شكل الهياكل الشبكية للمعدن) .

وتدل التصورات الحالية عن طبيعة التغير المغناطيسي على أن هذا التغير لا يسبب تغيراً في النظام الهندسي للهياكل الشبكية كما أسلفنا وإنما يسبب تغيراً في طبيعة الارتباط المتبادل بين الأغلفة الالكترونية الداخلية والخارجية للذرات .

* * *

الفصل الخامس

بنية الخلائط المعدنية

لا تستعمل المعادن بشكل تقني إلا في حالات خاصة وذلك عندما تكون هناك حاجة الى إحدى الخواص التي يستتبع بها المعدن النقي كناقلية النحاس المكهرباء ومقاومة الرصاص الكيميائية... الخ ، لذلك غالبا ما تستعمل بدلا من المعادن الصافية خلائط هذه المعادن مع معادن أو غير معدنية أخرى . وتعرف الخليطة بصفة عامة بأنها مادة ناتجة من مزج عنصرين (أو أكثر) مع بعضهما في الحالة السائلة (أي بصهرهما معاً أو بصبهما فوق بعضهما في الحالة المصهورة) أو بصهر أحدهما وإذابة الآخر فيه بحالته الطبيعية (الصلبة) .

إن بنية الخليطة المعدنية أعقد من بنية المعدن الصافي ، وتتعلق هذه البنية بشكل رئيس بنوع الارتباطات التي تحصل عادةً بين العناصر المشكلة للخليطة ، إذ يمكن أن تكون بنية الخليطة مزيجا ميكانيكيا لبلورات مستقلة من كلا العنصرين ويمكن لعناصر الخليطة أن تتحد كيميائياً مع بعضها مشكلةً مركبات كيميائية ويمكن أن يذوب بعضها في الآخر في الحالة الصلبة مشكلة محاليل معدنية صلبة كما يمكن أن تتشكل بعض الأطوار التي يصعب نسبها الى أي من المركبات والمحاليل آتفة الذكر وتتمتع بخواص وسطى (أي أن يجمع الطور المتشكل ما بين خواص المركب الكيميائي والمحلول المعدني الصلب مثلاً) .

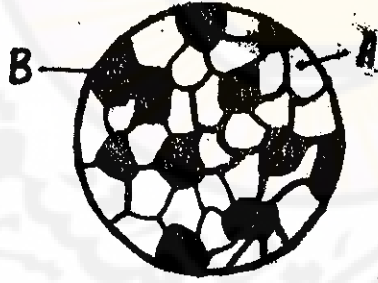
وسوف نقوم في هذا الفصل بدراسة التفاعلات التي يمكن أن تحدث بين مكونات الخلائط المعدنية وما ينتج عنها من أطوار وعناصر بنية .

٥ - ١ - المزيج الميكانيكي :

يتشكل المزيج الميكانيكي لعنصرين A و B (مثلاً) وذلك عندما يكون العنصران غير قابلين للذوبان أحدهما بالآخر في الحالة الصلبة ولا يتحدان مع بعضهما لتشكيل أي مركب كيميائي أو معدني . وطبقاً لهذه الشروط تكون الخليطة مؤلفة من بلورات مستقلة لكل من A و B (انظر الشكل ٥ - ١) .

وتظهر استقلالية بلورات العنصرين A و B بشكل واضح على البنية المجهرية عندما تكون هذه البلورات كبيرة الحجم نسبياً . وتبيّن دراسة البنية الداخلية للخليطة بالأشعة السينية في هذه الحالة على أن هناك نوعين من الهياكل الشبكية (هياكل المعدن A وهياكل المعدن B) .

وتتعلق الخواص الميكانيكية للخليطة بنسبة العناصر المشاركة في تشكيل هذه الخليطة وكذلك بشكل الحبيبات وأبعادها وتأخذ قيم هذه الخواص مكاناً وسطياً بين قيم الخواص لكل من العنصرين .



الشكل (٥ - ١) : البنية البلورية لمزيج ميكانيكي لعنصرين A و B .

٥ - ٢ - المركب الكيميائي :

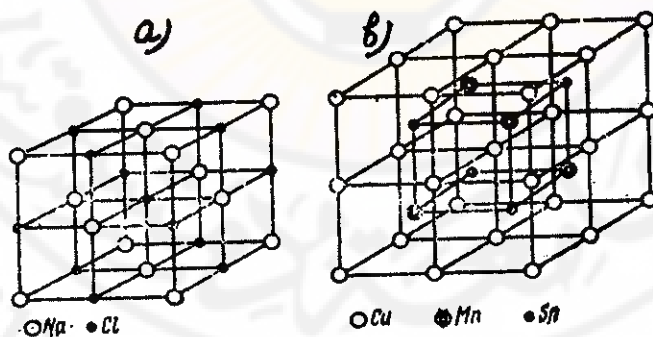
إن ما يلاحظ عند تشكل المركب الكيميائي هو ما يلي :

٢ - تكون النسبة العددية بين ذرات العنصرين المشاركين في التفاعل بحيث يمكن كتابتها وفق الصيغة البسيطة التالية : $A_m B_n$ (حيث : m و n أعداد صحيحة) •

ب - يأخذ شكل الهيكل الشبكي للمركب الكيميائي شكلاً خاصاً بحيث تكون ذرات العناصر المشاركة في بناء هذا الهيكل مرتبة ترتيباً هندسياً منتظماً •

ولبيان ذلك نأخذ مركبين كيميائيين أحدهما يتشكل من ذرات معدن وغير معدن والآخر من ذرات معادن فقط :

المركب الكيميائي الأول هو $NaCl$ حيث نلاحظ من الشكل (٥ - ٢) أن شوارد الصوديوم تشكل هيكلاً شبكياً على شكل مكعب متمركز وجهياً وتشكل شوارد الكلور هيكلاً شبكياً مشابهاً للآخر ولكنه ينزلق بنقطة بنصف طول ضلع الهيكل الشبكي عنه • ومن الشكل نلاحظ أن النسبة العددية بين شوارد الصوديوم وشوارد الكلور هي : $(Na : Cl = 1 : 1)$ وهنا يمكننا أن نقول إنه إذا كان عدد ذرات العنصر B المحيطة بذرة واحدة من العنصر A هو العدد نفسه لذرات العنصر A المحيطة بذرة واحدة من العنصر B فإن الصيغة الكيميائية للمركب هي AB ، أما إذا كان عدد ذرات العنصر A



الشكل (٥ - ٢) : (a) - الهيكل الشبكي للمركب $NaCl$ •
(b) - الهيكل الشبكي للمركب Cu_2MnSn •

المحيطة بذرة واحدة من العنصر B هو أقل بمرتين من عدد ذرات العنصر B المحيطة بذرة واحدة من العنصر A فإن الصيغة تصبح AB_2 ... وهكذا •

نحن نعلم أنه عندما يتشكل مركب كيميائي من تفاعل معدن مع عنصر غير معدني فإن الرابطة الموجودة هي رابطة شاردية حيث تعطي ذرة المعدن إلكترونات التكافؤ متحولة إلى شاردة موجبة بينما تأخذ ذرة العنصر غير المعدني هذه الإلكترونات متحولة إلى شاردة سالبة ، وفي هيكل المركب الكيميائي من هذا النوع ترتبط العناصر ببعضها تحت تأثير قوى التجاذب الكهروستاتيكية والرابطة الموجودة بين الشوارد هي رابطة متينة والتركيب الكيميائي للمركب ثابت - أي أنه لن تكون هناك زيادة أو نقصان في عدد الذرات اللازمة لتشكيل المركب •

أما المركب الثاني فهو $Cu_2 Mn Sn$ المتشكل من ذرات معادن فقط • وفي هذه الحالة تتوضع شوارد المعادن الموجبة في عقد الهيكل الشبكي ويدور حولها الغاز الإلكتروني والرابطة الموجودة هنا هي رابطة معدنية ، وهذه الرابطة أضعف من الرابطة الشاردية ، إذ يسكن في ظروف معينة أن تتغير نسبة أي من العناصر المشاركة في هذه الرابطة • ولهذا السبب فإن تشكل المركب الكيميائي من ذرات المعادن فقط لا يتبع قانون التكافؤ كما في حال تشكل المركب الكيميائي من ذرات معدن مع عنصر غير معدني •

ونود هنا أن ننوه إلى أنه بإمعان النظر في الهيكل الشبكي الموجود على الشكل (٥ - ٢ ب) الممثل للمركب الكيميائي $Cu_2 Mn Sn$ نلاحظ مايلي :

٨ ذرات من معدن النحاس موجودة في زوايا الهيكل حيث يتبع لهذا الهيكل $\frac{1}{8}$ هذه الذرات ، ٦ ذرات من معدن النحاس أيضاً موجودة في مراكز جوف الهيكل حيث يتبع لهذا الهيكل $\frac{1}{4}$ هذه الذرات ، ١٢ ذرة من معدن النحاس أيضاً متوضعة في منتصفات حروف الهيكل حيث يتبع $\frac{1}{2}$ هذه الذرات للهيكل ، ذرة واحدة من

النحاس أيضا موجودة في مركز الهيكل وتتبع هذه الذرة بكاملها للهيكل • لهذا نلاحظ من الشكل (٥ - ٢ b) أن مايتبع لهذا الهيكل هو :

٨ ذرات من معدن النحاس (إذا أخذنا بعين الاعتبار ما ذكر آنفا) •
٤ ذرات من معدن المنغنيز و ٤ ذرات من معدن القصدير ذلك لأن ذرات هذين المعدنين تقع بكاملها داخل الهيكل الشبكي وتتبع له •

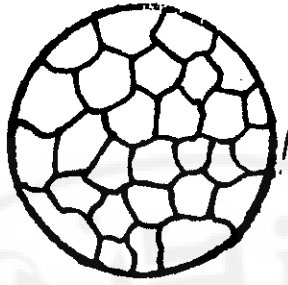
وعلى هذا الاساس فان صيغة هذا المركب هي : إما $Cu_8 Mn_4 Sn_4$ أو $Cu_2 Mn Sn$ كما أسلفنا •

ونود هنا أن ننوه أيضا الى أن المركب الكيميائي يتمتع بصفة عامة بدرجة حرارة انصهار (أو تجمد) معينة وثابتة ، أما خواصه فتتغير بشكل مفاجيء عند تغير التركيب •

٥ - ٢ - محلول معدني صلب قاعدته احد عناصر الخليطة :

تكون غالبية الخلائط المعدنية في حالتها المنصهرة محاليل سائلة وحيدة الطور متجانسة ، وعند تحول هذه المحاليل السائلة المتجانسة الى الحالة الصلبة فانه في بعض الحالات تحافظ الخليطة على تجانسها وبالتالي تحافظ على قابلية الذوبان التي كانت موجودة في الحالة السائلة • ويؤسسى الطور الصلب المتشكل نتيجة تبلور هذا النوع من الخلائط المحلول المعدني الصلب •

يبيّن التحليل الكيميائي والطيفي للمحاليل المعدنية الصلبة أن المحلول المعدني الصلب يسكن أن يحتوي على عنصرين أو أكثر ، بينما تبيّن دراسة البنية المجهرية أن بنيته هي بلورات متجانسة كما في المعدن النقي (انظر الشكل ٥ - ٣) ، وبينما تبيّن الدراسة بالأشعة السينية أن هناك شكلا واحدا فقط للهياكل الشبكية



الشكل (٥ - ٣) : البنية المجهرية للمحلول المعدني الصلب

في المحلول المعدني الصلب (كما في المعدن النقي) •

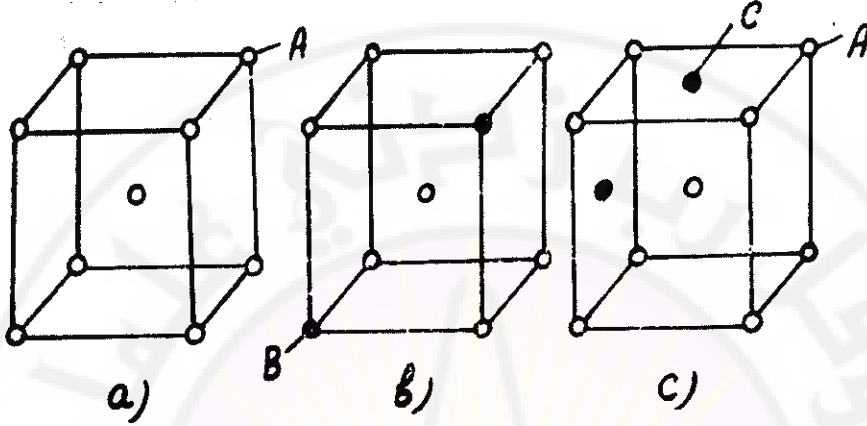
لهذا وخلافا للمزيج الميكانيكي فإن المحلول الصلب هو طور وحيد ويتألف من نوع واحد من البلورات ويتمتع بنموذج واحد لهياكله الشبكية ، وخلافاً للمركب الكيميائي فإن المحلول الصلب لا يتواجد فقط من أجل نسبة مشاركة محددة وثابتة لعناصر الخليطة وإنما يتواجد في مجال تركيز معين (أي تتغير نسب العناصر المشاركة في مجال معين) •

إن بنية المحلول المعدني الصلب (الذي يكون فيه أحد عناصر الخليطة هو العنصر الأساسي) تكون بحيث تدخل في الهيكل الشبكي للمعدن الأساسي (أي للمعدن المذيب) ذرات المعدن المذاب • وهناك نوعان من الذوبان في الحالة الصلبة :

١ - محاليل صلبة تبادلية : وفيها يكون الهيكل الشبكي للمعدن A مثلاً (انظر الشكل ٥ - ٤ a) ، أما ذرات المعدن المذاب B فإنها تدخل في بناء الهيكل الشبكي بأخذها بعض المراكز التي كان يجب أن يأخذها المعدن الأساسي نفسه (انظر الشكل ٥ - ٤ b) •

٢ - محاليل صلبة تداخلية : ويتم الذوبان بدخول ذرات المعدن المذاب C

في الهيكل الشبكي للمعدن A وتوضعها بين ذراته كما هو موضح على الشكل (٥-٤) .

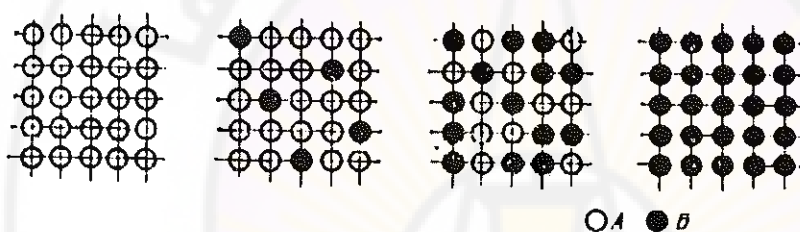


الشكل (٥-٤)

- (a) هيكل شبكي على شكل مكعب متمركز حجبياً للمعدن A النقي .
- (b) محلول معدني صلب تبادلي .
- (c) محلول معدني صلب تداخلي .

عند تشكل المحلول المعدني الصلب يحافظ أحد عناصر الخليطة على هيكله الشبكي كما ذكرنا آنفاً ويُسمى بالعنصر المذيب ، ويؤدي دخول ذرات العنصر المذاب بصفة عامه الى تشوه الهيكل الشبكي للمذيب وتغير أبعاده . فمثلاً في المحاليل الصلبة التبادلية تتغير أطوال أضلاع الهياكل الشبكية تبعاً للفرق بين أقطار ذرات العنصر المذيب والعنصر المذاب . فإذا كانت ذرة العنصر المذاب أكبر من ذرة العنصر المذيب فإن الهيكل الشبكي يكبر حجمه ، وإذا كانت أصغر فإنه يتقلص . أما في المحاليل الصلبة التداخلية فإن أطوال أضلاع الهياكل الشبكية تزداد في جميع الحالات ذلك لأن أقطار ذرات العنصر المذاب تكون دائماً أكبر من المسافات الموجودة بين ذرات العنصر المذيب والتي تتوضع فيها ذرات العنصر المذاب .

يمكن أن يكون الذوبان في المحاليل الصلبة التبادلية محدوداً أو غير محدود (أي مطلق) . فعندما يكون الذوبان مطلقاً فإن أي كمية من ذرات المعدن A يمكن أن يحل محلها ذرات من المعدن B ولهذا فإن ازدياد تركيز المعدن B في المحلول الصلب التبادلي (الذي قاعدته المعدن A) سوف يؤدي باستمرار إلى ازدياد ذرات المعدن B التي تحل محل ذرات المعدن A وهكذا حتى تصل لمرحلة تكون جميع ذرات المعدن A قد استبدلت بها ذرات المعدن B - أي وكأننا قد حولنا الهيكل الشبكي للمعدن A بالتدريج إلى هيكل شبكي للمعدن B (انظر الشكل ٥ - ٥) . إن هذا



○ A ● B

الشكل ٥ - ٥ : الهياكل الشبكية للمحلول المعدني الصلب عندما يكون الذوبان تبادلياً وغير محدود .

يمكن أن يحدث إذا كان لكل من المعدنين الهيكل الشبكي نفسه .

من هنا نستنتج أن الشرط الأول لتشكيل محاليل صلبة يكون الذوبان فيها مطلقاً هو تشابه الهياكل الشبكية لكلا العنصرين (المذيب والمذاب) .

أما الشرط الثاني لتشكيل محاليل صلبة يكون الذوبان فيها مطلقاً فهو أن يكون الفارق صغيراً بين أقطار ذرات العنصرين (المذيب والمذاب) . فإذا تشابهت الهياكل الشبكية لكلا العنصرين واختلفت أقطار ذراتهما بشكل كبير فإن تشكل محلول صلب منهما سيؤدي إلى تشوه هيكل العنصر الأساسي بشكل كبير ، وعندما يصل تشوه الهيكل إلى حدٍ معين يصبح غير مستقر وعندها يكون الذوبان

قد وصل الى حد الاشباع والهيكل الشبكي لن يستطيع بعد حد الاشباع اذابة
أي ذرة أخرى .

أما الشرط الثالث لتشكيل محاليل صلبة يكون الذوبان فيها مطلقا فهو أن
تكون عناصر الخليطة قريبة من بعضها بعضا بتركيبها الالكتروني وبطبيعتها
الفيزيائية . فلقد لوحظ أن الذوبان المطلق في الحالة الصلبة يظهر جليا عند العناصر
التي تتوضع بالقرب من بعضها بعضا في الجدول الدوري للعناصر .

يعتبر توافر الشروط الثلاثة آتفة الذكر ضروريا حتى يكون الذوبان مطلقا في
الحالة الصلبة ولكنه في بعض الاحيان ليس كافيا . فمثلا الخليطة التي تحتوي
على معدني الذهب والفضة فقط يكون الذوبان فيها محدودا في الحالة الصلبة على
الرغم من توافر الشروط الثلاثة في هذه الحالة أيضا .

وإذ لم يحقق عنصرا الخليطة جميع الشروط الثلاثة فإن الذوبان في الحالة
الصلبة يكون محدودا . ولقد لوحظ أن نسبة الذوبان في الحالة الصلبة تنخفض
كلما ازداد الفرق بين أقطار ذرات العنصرين واختلفت خواصهما .

٥ - ٤ - محلول معدني صلب قاعدته مركب كيميائي :

تعرفنا آتفا على المحلول المعدني الصلب الذي يكون فيه أحد عناصر الخليطة
هو العنصر الاساسي (المذيب) وبيننا أن الهيكل الشبكي في هذه الحالة يتبع
للعنصر الاساسي . لكن القدرة على تشكيل المحلول الصلب لا تقتصر على المعادن
النقية فحسب وإنما تتعداها الى المركبات الكيميائية ، ففي هذه الحالة يحافظ
المركب الكيميائي $A_m B_n$ على هيكله الشبكي ، أما كمية الذرات الزائدة
(ذرات العنصر B مثلاً) فإنها تذوب في هذا الهيكل بحيث تحل محل ذرات

العنصر A في عقد الهيكل ، أو أن تكون هناك ذرات من عنصر آخر C
يمكن أن تذوب في الهيكل الشبكي لهذا المركب ، حيث يمكن لهذه الذرات أن
تحل محل ذرات العنصر A أو العنصر B في عقد الهيكل الشبكي .

ولقد أظهر لنا الشكل (٥ - ٢ b) كيف يكون الهيكل الشبكي للمركب
الكيميائي الذي اتحدت فيه ثلاثة معادن هي : النحاس والمنغنيز والقصدير . فإذا
فرضنا أن الرابطة الموجودة هنا هي الرابطة المعدنية بحيث يعطي كل معدن
الالكترونات من المدار الخارجي للذرة ولتشكل جميع هذه الالكترونات الغاز
الالكتروني كما نعلم . وإذا كان محتوى النحاس في الخليطة يفوق كمية النحاس
اللازمة لتشكيل المركب الكيميائي وفق النسبة العددية المطلوبة وحصل أن حلت
ذرة من النحاس (نظرا لكميته الزائدة) محل ذرة من المنغنيز فإن ذلك سيؤدي
للحصول على محلول معدني صلب قاعدته المركب الكيميائي . ومن هنا يتضح لنا
أن تشكل محلول صلب قاعدته مركب كيميائي يجعل صيغة هذا المركب غير مطابقة
للنسبة العددية للذرات .

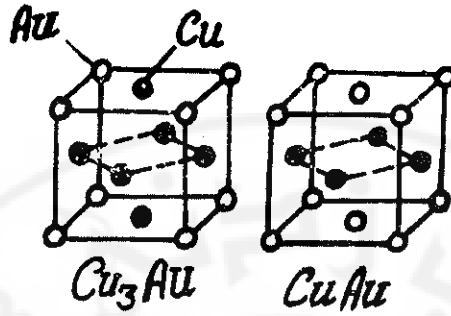
بيئنا آفها أنه يمكن لذرات غريبة (غير الذرات الداخلة في تركيب المركب
الكيميائي) أن تحل محل بعض ذرات المركب الأساسية وعندها (وكما نعلم)
نحصل على محلول معدني صلب قاعدته المركب الكيميائي أيضا ، وتستخدم في
الوقت الحاضر صيغ كيميائية معينة للدلالة على هذه الأنواع من المحاليل المعدنية
الصلبة . فمثلاً يتنع بروم الحديد $Fe_4 B_2$ (كتركيب كيميائي) بالقدرة
على إذابة الكروم والكربون بحيث تحل ذرات الكروم محل بعض ذرات الحديد
في عقد الهيكل الشبكي وتحل ذرات الكربون محل بعض ذرات البروم في عقد
هذا الهيكل ، ومع كل هذا فإن النسبة بين ذرات المعدن وذرات العنصر الأخر في
المركب تبقى محافظة على قيستها وبمعنى آخر يمكن كتابة النسبة على الشكل
 $(Fe + Cr) : (B + C) = 4 / 2$ ، ولهذا فإن صيغة المحلول المعدني الصلب
قاعدته المركب الكيميائي $Fe_4 B_2$ هي الصيغة التالية : $(Fe, Cr)_4 (B, C)_2$.

٥ - ٥ - ٥ المحاول المعدني الصلب المنتظم :

إن أول من اكتشف ظاهرة تحول المعدني الصلب الى محلول معدني صلب منتظم هو العالم السوفيتي كورناكوف في عام ١٩١٤ وذلك عندما تبين له عند دراسة المقاومة الكهربائية لخلائط النحاس والذهب أن خواص هذه الخلائط تتغير بدون أن تتغير بنيتها البلورية ، وعندما استخدم كورناكوف الأشعة السينية في دراسة البنية الداخلية لهذه الخلائط اتضح له أن سبب تغير الخواص هو إعادة توزيع ذرات الذهب والنحاس داخل الهياكل الشبكية للسحائيل الصلبة المشكلة في هذه الخلائط .

من المعروف أن ذرات العنصر المذاب تتوزع بدون انتظام في الهياكل الشبكية للعنصر للمذيب وذلك عندما يكون المحلول الصلب عاديا . ولكن من أجل ظروف معينة فإن الذرات تحتل أماكن محددة في عقد الهيكل الشبكي ويصبح توزيعها توزيعاً منتظماً ، لذا يُسمى المحلول الصلب الذي يكون توزيع الذرات في هياكله الشبكية توزيعاً منتظماً بالمحلول المعدني الصلب المنتظم .

فاذا أخذنا على سبيل المثال خليطة النحاس والذهب حيث يتمتع كل من عنصري الخليطة بنفس الهيكل الشبكي ويدوب هذان المعدنان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة الصلبة . وينعدم في المحلول الصلب العادي للنحاس والذهب وجود القاعدة الدقيقة والثابتة في توزيع ذرات كل من هذين المعدنين في عقد المكعب المتمركز وجداً ، ويتعاق احتمال وجود هذه الذرة أو تلك في عقدة ما من عقد الهيكل الشبكي . بتركيز الخليطة . ولكن عند ظروف معينة (كأن يكون تبريد المحلول الصلب بطيئاً جداً) فإن ذرات النحاس والذهب تحتل أماكن محددة في الهيكل الشبكي (انظر الشكل ٥ - ٦) .



الشكل (٥ - ٦) : الهياكل الشبكية للمحاليل الصلبة المنتظمة في مجموعة النحاس والذهب .

فسن هذا الشكل نلاحظ أنه إذا احتلت ذرات الذهب كل العقد الزاوية في المكعب المتمركز وجهاً وذرات النحاس مراكز الوجوه فإن النسبة بين ذرات النحاس والذهب تكون (٣ الى ١) ويمكننا التعبير عن هذا الطور بالصيغة الكيمائية التالية Cu_3Au . وإذا لم تشغل ذرات النحاس سوى مراكز أربعة وجوه من وجوه المكعب وما تبقى من عقد الهيكل شغلتها ذرات الذهب فإن الصيغة تصبح $CuAu$.

يمكن أن تكون عملية تنظيم الذرات في عقد الهيكل الشبكي للمحلول تامة وغير تامة . ففي الحالة الأولى تشغل جميع الذرات الأماكن المخصصة لها في عقد الهيكل للمحلول الصلب ، وفي الحالة الثانية تشغل بعض الذرات أماكن محددة في الهيكل بينما يتوضع البعض الآخر بدون انتظام . إن تنظيم الذرات في عقد الهيكل الشبكي للمحلول الصلب هو عملية انتشارية - أي أن التحول من هيكل غير منتظم الى هيكل منتظم يترافق بانتقال الذرات من عقدة الى أخرى ، ولهذا يعتبر التبريد البطيء أحد العوامل الهامة للحصول على محاليل صلبة منتظمة .

٥ - ٦ - المركبات الالكترونية :

يتشكل هذا النوع من المركبات بين معدن من مجموعة النحاس والفضة والذهب والحديد والكوبالت والنيكل والبالاديوم والبلاتين من جهة ومعدن آخر من مجموعة البيريليوم والتوتياء والكادميوم والالمنيوم والسيليسيوم والقصدير من جهة أخرى .

ولا يتعلق الاتحاد بين معدن المجموعة الاولى ومعدن المجموعة الثانية بالقيمة الاتحادية بل هناك نسبة محددة وثابتة في الاتحاد بين عدد الالكترونات الحرة (الالكترونات التكافؤ) في المركب وعدد ذرات المعدنين المشكلين لهذا المركب بحيث يكون :

$$\frac{\text{عدد الالكترونات}}{\text{عدد الذرات}} = \frac{3}{2} + \frac{1}{13} + \frac{7}{4}$$

ولكل نسبة من النسب الآتية الذكر هيكل شبكي يختلف عن الهيكل الموافق للنسبة الأخرى . فمثلاً عندما تكون النسبة $(\frac{3}{2})$ فإن الهيكل الشبكي المتشكل هو مكعب متركز حجبياً (ويدعى بالطور β) ، وإذا كانت النسبة $(\frac{13}{21})$ فإن الهيكل هو مكعب من النوع المعقد والمحتوي على ٥٢ ذرة من كلا المعدنين (ويدعى بالطور γ) ، وأما للنسبة $(\frac{7}{4})$ فالهيكل عبارة عن موشور سداسي (ويدعى بالطور δ) .

نصادف المركبات الالكترونية عادةً في الخلائط المعدنية التي تتسع بأهمية صناعية كبيرة مثل : خليطة النحاس - التوتياء ، النحاس - القصدير ، الحديد -

الألمنيوم، الحديد - السيليسيوم، الخ. وغالباً ما تصادف في نفس المجموعة الأطوار الثلاثة α و γ و β . فمثلاً في مجموعة النحاس - التوتياء يكون الطور β عبارة عن المركب $Cu Zn$ والطور γ عبارة عن المركب $Cu_5 Zn_8$ والطور α عبارة عن المركب $Cu Zn_3$.

إن وجود كلٍّ من النسبة المحددة والثابتة بين عدد الالكترونات وعدد الذرات والهيكل الشبكي الخاص للمركبات الالكترونية هو أهم ما يميز هذه المركبات عن المركبات الكيميائية. ولا تستوعب المركبات الالكترونية بتوضع منتظم للذرات في عقد الهيكل الشبكي. وعند تسخين الخليطة الى درجات حرارة عالية فإن ذرات كلا العنصرين لا تشغل أماكن محددة وثابتة في الهيكل الشبكي للمركب الالكتروني، وعند انخفاض درجة الحرارة الى قيمة معينة فإن عملية تنظيم ذرات المعدنين في عقد الهيكل تبدأ ولا تنتهي أي عملية تنظيم غير تامة.

ويبين الجدول (٥ - ١) المركبات الالكترونية التي يمكن أن تصادفها في خلاط النحاس الصناعية.

٥ - ٧ - المركبات الكيميائية المعقدة :

تشكل المركبات الكيميائية المستقرة التي تكون الرابطة فيها من النوع الشاردي (أو الإيوني) بصفة عامة نتيجة اتحاد العناصر ذات الطبيعة المختلفة والتي تكون أقطار ذراتها متباينة بشكل كبير (ولقد تعرفنا على هذه المركبات سابقاً) . ولكن هناك بعض المركبات الكيميائية التي يكون التباين فيها بين أقطار الذرات المتحدة ليس كبيراً وإنما وسطياً ، حيث تكون النسبة بين قطر ذرة أحد المعدنين وقطر ذرة المعدن الآخر في حدود (١.٢ : ١) وصيغة المركب الكيميائي المتشكل تكون على الشكل AB_2 . ونورد فيما يلي بعضاً من أنواع هذه المركبات

الجدول (٥ - ١) : مركبات الالكترونية في خلاطة النحاس الصناعية

المركبات الالكترونية لمجموعات مختلفة				نوع البنية الشبكية	عدد الالكترونات		نوع الطور
Cu-Si	Cu-Al	Cu-Sn	Cu-Zn		عدد الذرات		
Cu ₃ Si	Cu ₃ Al	Cu ₃ Sn	CuZn	مكعب متمركز حجمياً	$\frac{3}{2}$		β
Cu ₃₁ Si ₈	Cu ₉ Al ₄	Cu ₃₁ Sn ₈	Cu ₅ Zn ₈	مكعب من النوع القند	$\frac{21}{12}$		γ
Cu ₃ Si	Cu ₅ Al ₃		CuZn ₁₃	موشور سداسي	$\frac{7}{4}$		ϵ

ونوع هياكلها الشبكية :

١ - المركبات : $Zr Mo_2$ ، $Ti Cr_2$ ، $Mg Cu$ وغيرها • وتبلور هذه المركبات على شكل مكعبات معقدة •

٢ - المركبات : $Mg Zr_{1.2}$ ، $Fe Be_2$ ، $W Fe_2$ ، $Mo Fe_2$ وغيرها • وتبلور على شكل مواشير سداسية معقدة •

٣ - المركبات : $Ti Co_2$ ، $Zr Fe_2$ ، $Mg Ni_2$ وغيرها • وتبلور على شكل مواشير سداسية معقدة أيضا ولكن من نوع يختلف عن النوع الذي تتبلور وفقه المركبات السابقة •

تصادف هذه المركبات عادةً في الخلائط المعدنية التي تقاوم درجات الحرارة العالية ، وتكون هذه المركبات على شكل دقائق معدنية ترفع من قيم المتانة لهذه الخلائط •

٥ - ٨ - المركبات التداخلية (الاطوار التداخلية) :

تشكل الاطوار التداخلية من ذرات المعادن والعناصر غير المعدنية بحيث تكون

أنصاف أقطار ذرات هذه العناصر صغيرة جدا (مثل : الهيدروجين $r_H = 0,46 \text{ \AA}$)

والنيتروجين $r_N = 0,71 \text{ \AA}$ والكربون $r_C = 0,77 \text{ \AA}$) وتشكل الاطوار التداخلية

عندما تكون النسبة بين نصف قطر ذرة العنصر غير المعدني ونصف قطر ذرة المعدن تساوي 0,59 أو أقل • ففي هذه الحالة تشكل ذرات المعدن الهيكل الشبكي

والذي يكون عادة من النوع البسيط (مكعبا متسكرا حجبيا أو وجهيا أو مشورا سداسيا مزدحما بالذرات) بينما تدخل ذرات العنصر الآخر في الأماكن الخالية بين ذرات المعدن ، وهذا أهم ما يميز بنية الهياكل الشبكية للاطوار التداخلية •

تحقق الاطوار التداخلية الشروط التي يجب أن تتوافر في المركبات الكيميائية؛

إذ يمكن صياغة النسب العددية للذرات في صيغ بسيطة مثل :

$$M X_2 \cdot M X \cdot M_2 X \cdot M_4 X$$
 (حيث : M - رمز المعدن ، X - رمز غير المعدن) ، ولهذا يمكن أن تنسب هذه الانوار الى المركبات الكيميائية •

وهنا نود أن ننوه الى الميزات الاساسية التي يتمتع بها المحلول الصلب الذي قاعدته الطور التداخلي • فلقد اتضح تجريبيا أن هذا النوع من المحاليل الصلبة لا يحتوي على كميات كبيرة من ذرات العنصر غير المعدني ، بينما يمكن أن يحتوي على ذرات معدنية • والسبب في وجود هذه الكمية الزائدة من ذرات المعدن يعود الى مايلي :

أ - لا تتمتع الاطوار التداخلية عادة بنسبة عددية محددة للذرات تتشكل على أساسها هذه الاطوار •

ب - لا يمكن أن تحل ذرة المعدن محل ذرة اللامعدن في هذا المحلول نظرا لكبر حجم الاولى •

ج - عدم كفاية ذرات اللامعدن لتشغل جميع الاماكن الخالية في الهيكل الشبكي في أغلب الاحيان •

ونود أن ننوه أيضا الى أن أكثر الكرييدات والنيتريدات التي نصادفها في أنواع الفولاذ المختلفة وخلائط معدنية أخرى هي أطوار تداخلية •

٥ - ٩ - قاعدة الطور :

بيئنا سابقاً أن أي تحول في مجموعة ما لا يمكن أن يتم عملياً إذا لم يتوافر تسخين زائد (أو فرط في التبريد) ولو بقيم صغيرة جداً • ولهذا فاننا عندما نتكلم عن التحولات المتوازنة فاننا نقصد تلك التحولات التي لا يمكن أن تتم نظرياً ولكنها

تتم عملياً عندما يكون التسخين (أو التبريد) بطيئاً جداً •
ويُعتبر عادة عن وجود الأطوار في حالة توازن (أي حالة الأطوار طبقاً لشروط
التوازن النظرية) بقاعدة الطور أو قانون جيبس (Gibbs). وتتضمن قاعدة الطور
هذه العلاقة بين عدد درجات الحرية للمجموعة المتوازنة وكية كل من الأطوار
والمكونات لهذه المجموعة •

الطور هو ذلك الجزء من المجموعة المنفصل عن الأجزاء الأخرى (الأطوار
الأخرى) لهذه المجموعة ويفصله عنها سطح فاصل بحيث أنه عند المرور عبر هذا
السطح الفاصل يتغير وبشكل مفاجئ، أما التركيب الكيميائي أو البنية أو كلاهما
معاً • من هنا نستنتج أن السائل المتجانس هو مجموعة أحادية الطور بينما المزيج
الميكانيكي لثلاثين من البلورات فهو مجموعة ثنائية الطور ذلك لأن البلورة الواحدة
تختلف عن جارتها بالتركيب ويفضلها عن بعضها سطوحها الخاصة •

أما المكونات فهي تلك العناصر التي تشكل المجموعة • من هنا نستنتج أن
المعدن البقية هو مجموعة مؤلفة من مكون واحد فقط، أما الخليطة لمعدنين فهي
مجموعة مؤلفة من مكونين ••• وهكذا •

وأما عدد درجات الحرية لمجموعة ما فهو عدد العوامل الداخلية والخارجية
(مثل درجة الحرارة والضغط والتركيز) والتي يمكن أن تتغير دون أن يتغير عدد
الأطوار في هذه المجموعة •

فاذا كان عدد درجات الحرية مساوياً للصفر فإن هذا يعني أن أي تغيير في أي
من العوامل الداخلية أو الخارجية يمكن أن يؤدي إلى تغيير في عدد الأطوار. وإذا كان
عدد درجات الحرية مساوياً الواحد فإن هذا يعني أنه يمكن أن يحدث تغييراً في
واحد فقط من العوامل الثلاثة الذكر دون أن تسبب تغييراً (زيادة أو نقصاناً) في عدد
الأطوار •

أما العلاقة الرياضية لقاعدة الطور والتي تربط ما بين عدد درجات الحرية F
وعدد المكونات m وعدد الأطوار n فيمكن كتابتها على الشكل التالي :

$$n + F = m + 2$$

(5.1)

ويدل الرقم 2 على درجة الحرارة والضغط . وإذا افترضنا أن جميع التحولات في المعادن والخلائط المعدنية تتم عند درجات حرارة يكون عندها ضغط أبخرة المعادن شبه معدوم وبالتالي فلن يكون لتغيرات الضغط المعتادة أي تأثير في حالة التوازن ، فإن المعادلة (5.1) تصبح على الشكل :

$$n + F = m + 1$$

(5.2)

وبامعان النظر في المعادلة (5.2) يمكننا أن نعرف كيف يتغير عدد درجات الحرية لمجموعة مؤلفة من مكون واحد مثلاً ($n = 1$) وذلك إذا قمنا بتطبيق هذه المعادلة على حالة التبلور للمعدن النقي . فعندما يكون المعدن في حالة السيولة فإن : $n = 1$ أي أن المجموعة مؤلفة من طور واحد هو السائل ، ولهذا فإن عدد درجات الحرية في هذه الحالة يساوي الواحد وذلك من المعادلة :

$$F = m - n + 1 = 1 - 1 + 1 = 1$$

(5.3)

وهذا يعني أنه يمكن تغيير درجة الحرارة دون أن نسبب أي تغيير في حالة المجموعة .

أما في لحظة التبلور فإن عدد الأطوار يصبح $n = 2$ (أي أن المجموعة تحتوي على طورين سائل وصلب) ، وبتطبيق المعادلة (5.2) نجد أن :

$$F = m - n + 1 = 1 - 2 + 1 = 0$$

(5.4)

وهذا يعني أن عدد درجات الحرية أصبح مساوياً للصفر وأن هذين الطورين (الصلب والسائل) قد أصبحا موجودين في حالة التوازن فقط عند درجة حرارة محددة وثابتة هي درجة حرارة الانصهار (أو التجمد) للمعدن النقي ، ولن تتغير درجة الحرارة هذه حتى يختفي أحد الطورين نهائياً من مجموعة التوازن .

الفصل السادس

مخططات توازن الخلائط المعدنية

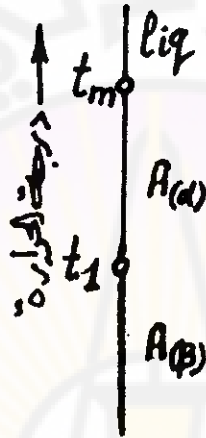
تسمى الخليطة عادةً حسب عدد مكوناتها خليطة ثنائية (من مكونين) أو ثلاثية (من ثلاثة مكونات) ... الخ. وسنقتصر في دراستنا على مخططات توازن الخلائط الثنائية - أي المكونة من مكونين (معدنين) فقط.

وتتم دراسة الخلائط المعدنية ورسم مخططات توازنها تجريبياً ، حيث تُدرس ظروف التبلور وغيره من التغيرات التي تطرأ على بعض خواص الخليطة وذلك عن طريق المراقبة ، إذ يتم مراقبة تغيرات درجة حرارة الخليطة والتحولات التي تظهر في البنية بخاصة عندما تكون البنية قابلة للتحويل أثناء التبريد . ولكن وقبل أن نبدأ بدراسة كيفية إنشاء مخططات التوازن للخلائط المعدنية وماهي أنواع هذه المخططات وأشكالها من الواجب أن لا يغيب عن أذهاننا أن كل تغير في البنية يحتاج الى الوقت الكافي له لكي يتم . فإذا كان التبريد سريعاً والوقت الذي نعطيه للتغير أقل من الوقت اللازم فإن هذا التغير سوف يتأخر عن الحدوث وقد لا يحدث أبداً.

٦ - ١ - ملاحظات عامة حول إنشاء مخطط التوازن :

يُعرّف مخطط التوازن على أنه المخطط الذي يُبيّن كيف تتغير حالة الخليطة عندما يتغير كل "من تركيزها ودرجة حرارتها".

فإذا كانت المجموعة مؤلفة من مكونٍ واحد فإن مخطط التوازن يتمتع بسحورٍ واحدٍ فقط هو محور درجة الحرارة . ولهذا فإن النقاط التي تظهر على هذا المحور تدل على درجات الحرارة التي يحدث عندها أي تحول ممكن في حالة هذا المكون (تحول طورى أو ألتروبي - انظر الشكل ٦-١) . أما إذا كانت المجموعة مؤلفة



الشكل (٦ - ١) : تغير حالة المجموعة المؤلفة من مكون واحد بتغير درجة الحرارة.

من مكونين فإن مخطط التوازن يتمتع بسحورين : أحدهما محور درجة الحرارة والآخر محور التركيز (انظر الشكل ٦-٢) .

يشكل محور العينات عادةً محور درجات الحرارة ، بينما يشكل محور السينات محور تركيز المكونين في الخليطة . ويساوي المحتوى الكلي للمكونين في الخليطة المقدار 100% . فمثلاً تبيّن النقطة C على محور التركيز أن نسبة المعدن B في الخليطة تساوي 40% ، والمعدن A 60% ، بينما تبيّن النقطة D أن نسبة المعدن B في الخليطة تساوي 60% والمعدن A 40% .

وكلما ابتعدنا عن النقطة A كبرت نسبة المعدن B في الخليطة ، بحيث تصبح هذه النسبة 100% في النقطة B . ولهذا فإن النقاط الحدودية على



الشكل (٦ - ٢) : محورا مخطط التوازن لمجموعة مؤلفة من مكونين .

المخطط موافق المعادن النقية ، وما بين هذه النقاط يُبيّن خلاط ثنائية من كلا المعدنين بنسب مختلفة .

تُبيّن كل نقطة على مخطط التوازن حالة خليطة ذات تركيز معين وعند درجة حرارة معينة . أما الخطوط التي تصل ما بين نقاط التحولات المتماثلة فإنها تحدد على مخطط التوازن تلك المنطقة التي تكون حالة الأطوار فيها متشابهة .

يتعلق شكل مخطط التوازن بمدى تفاعل المعدنين مع بعضهما ، وبمعنى آخر بمدى ذوبان أيٍّ من المعدنين في الآخر في الحالتين الصلبة والسائلة ومدى تفاعل هذين المعدنين مع بعضهما لتشكيل مركب كيميائي أو معدني .

٦ - ٢ - كيفية إنشاء مخطط التوازن تجريبياً :

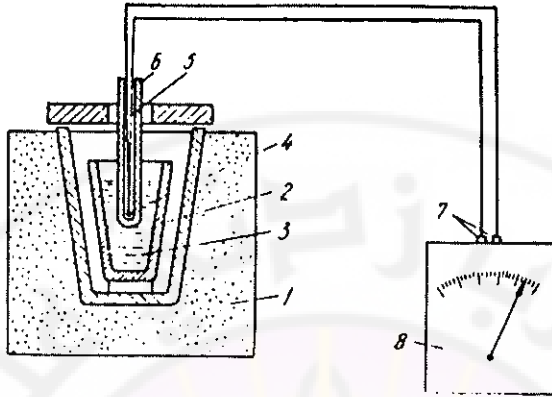
يستخدم لإنشاء مخطط التوازن عادةً ما يُسمى طريقة التحليل الحراري ، أي

أنه يتم إنشاء منحنيات التبريد لسلسلة من عينات الخلائط المعدنية الثنائية لهذين المعدنين بحيث تختلف نسبة كل من المعدنين في كل عينة عن التي تليها بمقدار 10% أو 5% أو 1% وذلك حسب نوع مخطط توازن الخليطة ، إذا كلما كان معقداً أصبح من الواجب تصغير فارق النسب بين العينات المتتالية . ويمكننا من خلال معرفة نقاط الانكسار أو التوقف على منحنيات التبريد هذه أن نحكم على التحولات والاتصالات التي تحدث في الخليطة من الحالة السائلة وحتى درجة حرارة المخبر .

ويتم قياس درجات حرارة المعادن (أو الخلائط المعدنية) باستعمال المزدوجات الحرارية . ويتلخص مبدأ المزدوجة الحرارية فيما يلي : تتألف المزدوجة الحرارية من سلكين لمعدنين مختلفين ، ويتم عادةً لحام إحدى نهايتي هذين السلكين في وحدة واحدة ، بينما تتربط النهايتان الحرتان لهذين السلكين مع مقياس ميللي فولت . فإذا سُخِّنَت النهاية الملاحومة للمزدوجة الحرارية فإن تياراً كهربائياً سوف يسري في المزدوجة الحرارية ومنها إلى مقياس الميللي فولت . وتزداد شدة هذا التيار بازدياد درجة حرارة النهاية الملاحومة للمزدوجة . ويتم عادةً في البداية معايرة المجموعة المؤلفة من المزدوجة الحرارية ومقياس الميللي فولت وذلك قبل استعمالها في قياس درجات الحرارة . ويبيّن الشكل (٦ - ٣) كيفية استخدام المزدوجة الحرارية في قياس درجات الحرارة لخليطة معدنية تم تبريدها من الحالة السائلة وحتى درجة حرارة المخبر .

إلا أنه عندما نحتاج لإنشاء مخطط التوازن بشكل دقيق لا بد من استخدام المجاهر الضوئية وأشعة γ وذلك بغية دراسة التحولات والاتصالات التي تطرأ عادةً على الخليطة أثناء تبريدها ، ذلك لأن طريقة التبريد الحراري آتمة الذكر لا تنفي بالفرض في أغلب الأحيان .

بعد هذه المقدمة البسيطة يمكننا الآن أن نورد مثالا حقيقياً (تجريبياً)



الشكل (٦ - ٣) : مخطط مقياس الحرارة المستخدم لدراسة تبلور المعادن والخلائط المعدنية بطريقة التحايل الحراري :

- 1 - فرن .
- 2 - بوقية .
- 3 - المعدن المصهور .
- 4 - النهاية الملوحة للمزدوجة الحرارية .
- 5 - المزدوجة الحرارية .
- 6 - أنبوب من الكوارتز لحماية المزدوجة الحرارية .
- 7 - نهايتا الساكين المربوطان مع مقياس الميلي فولت .
- 8 - مقياس الميلي فولت .

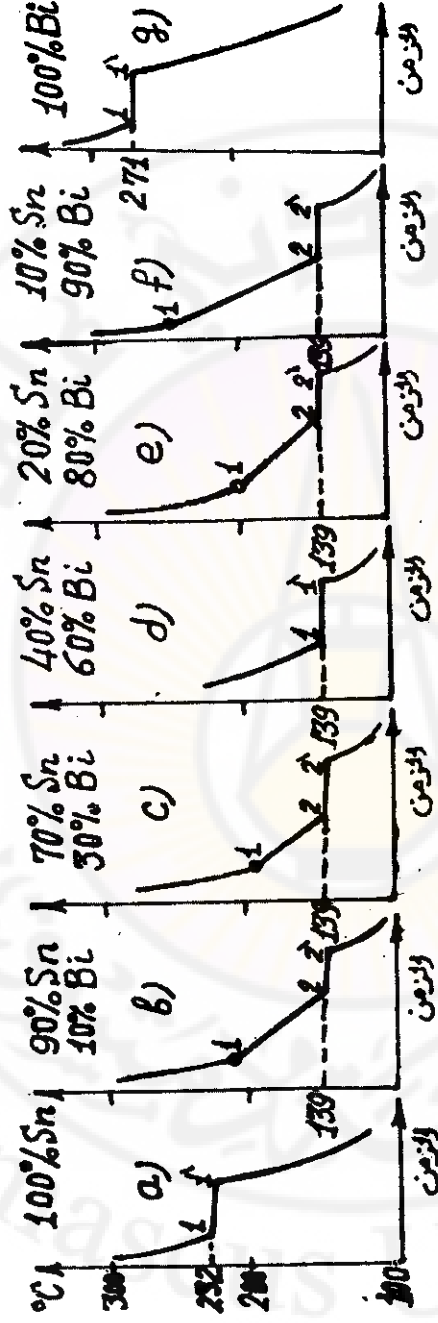
عن كيفية إنشاء مخطط التوازن لمجموعة مؤلفة من معدنين :

نفترض أنه لدينا مجموعة مؤلفة من معدنين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة وعديمي الذوبان ببعضهما في الحالة الصلبة ولا يتحدان مع بعضهما لتشكيل أي مركب كيميائي . وأفضل ما يشل هذه المجموعة هو إما خلائط القصدير والبرزموت أو خلائط الرصاص والأنتيموان وغيرها كثير نعتمد المجموعة الأولى (أي مجموعة القصدير والبرزموت) هي موضوع دراستنا هذه ، لهذا نأخذ عدة عينات من خلائط هذين المعدنين ونسب مختلفة من كلٍ منهما ، ثم نقوم بصهر هذه العينات كلاً على حدة ، وبعد ذلك نتركها تبرد بعد وضع مقياس الحرارة المناسب في كل عينة من هذه العينات المصهورة وذلك بهدف مراقبة درجة الحرارة في فترات زمنية متساوية ، ثم نرسم لكل عينة منحنى تبريد مستقل .

ومن خلال منحنيات التبريد هذه يمكننا أن نحكم على التحولات التي تطرأ على الخليطة (انظر الشكل ٦-٤) إذ يُمَيَّن المنحني الميَّس على الشكل (٦-٤ a) كيف يبرد القصدير النقي من درجة الحرارة التي أعلى من درجة حرارة الإنصهار مروراً بمرحلة التباور عند درجة الحرارة "C 232" ، بينما يُمَيَّن كل من المنحنيين (٦-٤ b و ٦-٤ c) أن هناك نقطة انكسار على منحني التبريد تسبق العتبة الأفقية ، حيث تدل نقطتا الانكسار على بدء انفصال بلورات صلبة من القصدير النقي داخل المصهور وعند درجتى حرارة مختلفتين ، إذ فلاحظ أن درجة حرارة بدء انفصال بلورات القصدير تنخفض بانخفاض نسبة القصدير في الخليطة .

ويسبب انفصال بلورات القصدير النقية داخل المصهور الى انخفاض نسبة القصدير فيه باستمرار وحتى درجة الحرارة "C 139" ، حيث تصبح نسبة القصدير 40% ، عندها تبلغ نسبة البزموت 60% ، ومن أجل هذه النسب بالذات يصبح المصهور المتبقي مشبعاً بكل المعدنين ، لهذا يتجمد هذا المصهور دفعة واحدة وعند درجة حرارة ثابتة ("C 139") معطياً مزيجاً من بلورات نقية لكلا المعدنين في الوقت نفسه . وهكذا نلاحظ أنه لن يحدث انفصال بلورات أولية لأي من المعدنين وذلك عند تبريد الخليطة التي تحتوي أساساً على 40% من القصدير و 60% من البزموت (انظر الشكل ٦-٤ d) ، وما يحدث هو أن المصهور يتحول مباشرة عند درجة الحرارة "C 139" الى مزيج من بلورات القصدير والبزموت النقية .

عند ازدياد نسبة البزموت في الخليطة عن 60% فإن البلورات الأولية التي ستنفصل داخل المصهور في هذه الحالة هي بلورات البزموت ، ويستمر انفصال هذه البلورات حتى تصل درجة حرارة الخليطة الى "C 139" ، عندها يتجمد المصهور المتبقي في بوتقة الاختبار أيضاً دفعة واحدة عند هذه الدرجة من الحرارة

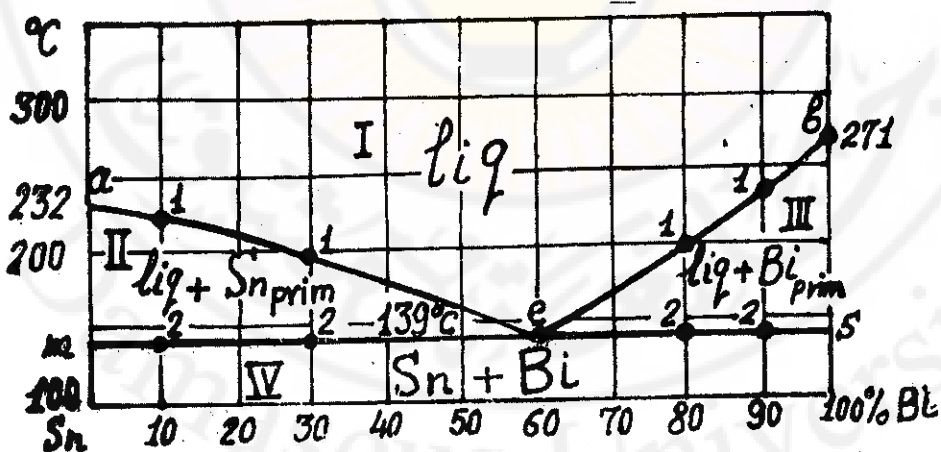


الشكل (٦ - ٤) : منحنيات تبريد لخلائط
تنأية من القصدير والبيزوت مختلفة النسب .

معطياً مزيجاً من بلورات نقيّة لكلا المعدنين (انظر الاشكال ٦ - ٤ e و ٤ - ٦)
 (٤) • ونلاحظ أنه كلما ازدادت نسبة البزموت في الخليطة الثنائية المختبرة
 ارتفعت درجة حرارة بدء انفصال بلورات البزموت الأولية على منحنى التبريد •
 أما المنحنى المبين على الشكل (٦ - ٤ g) فهو منحنى تبريد معدن البزموت
 النقي •

تسمى النقطة 1 على منحنيات التبريد آفة الذر نقطة السيولة ، بينما
 تسمى النقطة 2 نقطة التجمد •

وهكذا وبحصولنا على عددٍ كافٍ من منحنيات التبريد نستطيع أن نرسم
 مخطط التوازن لهذه الخليطة الثنائية وذلك بجمع هذه المنحنيات في مخططٍ واحد
 هو مخطط التوازن والذي تكون محاوره الإحداثية كما بينها على الشكل (٦ - ٢) •
 فإذا أخذنا كل منحنى من منحنيات التبريد هذه وحملناه على مخطط التوازن
 وذلك بعد تدوير المنحنى بزاوية 90° (أي افترضنا محور الزمن عمودياً على
 مستوي المخطط) حصلنا على مجموعة تقاطع على مخطط التوازن • فإذا
 وصلنا نقاط السيولة (أي النقاط 1 على المنحنيات) حصلنا على خط السيولة ،



الشكل (٦ - ٥) : مخطط توازن لخليطة ثنائية من القصدير والبزموت .

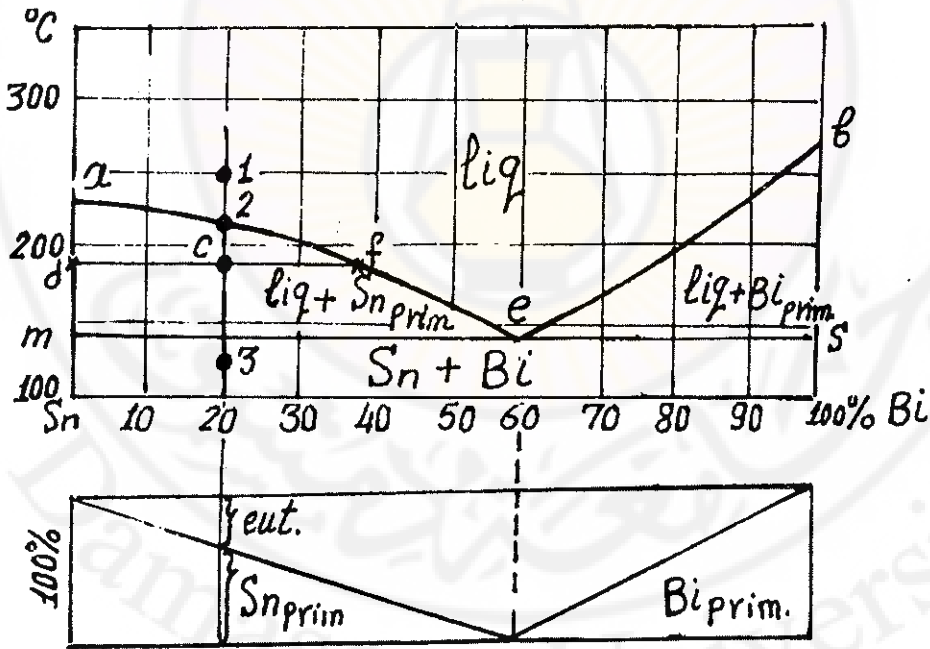
وإذا وصلنا نقاط التجمد (أي النقاط 2 على المنحنيات) حصلنا على خط التجمد . كما أنه بمراقبتنا لبنية العينات نستطيع معرفة الاطوار الموجودة في كل جزء من أجزاء مخطط التوازن . ويبيّن لنا الشكل (٦ - ٥) مخطط التوازن الخليطة القصدير والبرزموث والذي تم إنشاؤه طبقاً لما ذكر أعلاه .

٦ - ٢ - الاستنتاجات الممكنة من مخطط التوازن :

يُسمى الخط المنكسر $a \cdot b$ الذي يبدأ عنده انفصال البلورات داخل المصهور المعدني بخط السيولة (انظر الشكل ٦ - ٥) ، ويسمى الخط m_s الذي ينتهي عنده تبلور الخليطة بشكل كامل خط التجمد . أما النقطة (e) فتسمى النقطة اليوتكتيكية ، حيث يحدث عند هذه النقطة بالذات ما يسمى التفاعل اليوتكتيكي . ويُعرّف التفاعل اليوتكتيكي على الشكل التالي : هو تحول طور سائل إلى طورين صلبين عند درجة حرارة ثابتة .

ويحدث تحول هذا الطور السائل إلى طورين صلبين فقط في تلك الحالة التي يكون فيها هذا السائل مشبعاً بكلا المعدنين المكونين للخليطة . ومن الشكل (٦ - ٥) نلاحظ في حالتنا هذه أن درجة اشباع المحلول السائل بكلا معدني القصدير والبرزموث تحدث عندما تكون نسبة القصدير في السائل مساوية 40% ونسبة البرزموث 60% . وتختلف نسبة المكونين المؤدية لاشباع المحلول السائل بين خليطة وأخرى ، فمثلاً في خليطة الرصاص والأنتيموان يحدث اشباع المحلول السائل بكلا العنصرين وذلك عندما تكون نسبة الانتيموان مساوية 13% ونسبة الرصاص 87% ، ومن أجل هذه النسبة يحدث التفاعل اليوتكتيكي وعند درجة الحرارة 246°C .

كي نستطيع استنتاج مانود استنتاجه من مخططات التوازن لابد لنا من التعرف على القواعد المتبعة عادة في قراءة هذه المخططات واستعمالها من جهة وعلى طبيعة هذه المخططات من جهة ثانية . من الشكل (٦ - ٥) نلاحظ أن الخطوط aeb و ms تقسم المخطط إلى أربع مناطق . حيث المنطقة I هي المنطقة الوحيدة من بين المناطق الأربع التي تحتوي على طور واحد فقط ، وهذا الطور متجانس نظراً لأن المعدنين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة . لهذا تكون هذه المنطقة هي منطقة تجانس ، أما المناطق الثلاث الأخرى فهي مناطق عدم تجانس ذلك لأن كل منطقة تحتوي على طورين ، فالمنطقة II تحتوي على المحلول السائل وبلورات القصدير الأولية ، والمنطقة III تحتوي على المحلول السائل وبلورات البزموت الأولية ، أما المنطقة IV فتحتوي على بلورات القصدير وبلورات البزموت بشكل طورين صليين .



الشكل (٦ - ٦) : كيفية دراسة مخطط توازن مجموعة القصدير والبزموت

إذا أردنا معرفة وضع خليطة ما في هذه المجموعة فالتنا نبحت أولاً من مخطط التوازن عن تركيز هذه الخليطة ونقيم منه خطأ شاقولياً ، ثم نبحت عن درجة حرارة الخليطة ونحدد على الخط الشاقولي الذي أقسناه عند تركيز الخليطة . عندئذ نحصل على نقطة في إحدى المناطق الأربع ، ، فإذا كانت هذه النقطة واقعة في منطقة تجانس فإن الخليطة عندئذ تكون متجانسة ومكونة من طور واحد تركيزه هو تركيز النقطة نفسها . أما إذا كانت النقطة التي حصلنا عليها واقعة في إحدى مناطق عدم التجانس فتكون الخليطة عندئذ مكونة من طورين والنقطة بعد ذاتها لاتعطينا فكرة عن تركيز هذين الطورين (أي نسبة كل من مكوني الخليطة في كل من الطورين) . ولكن إذا أخذنا من النقطة مستقيماً أفقياً فإنه يقطع حدود المنطقة الموجودة فيها النقطة في نقطتين وكل من هاتين النقطتين تعني تركيز أحد طوري الخليطة . وحتى يتضح لنا ما ذكرناه نأخذ على سبيل المثال الخليطة الحاوية 20% بزموتاً و 80% قصديراً (انظر الشكل ٦-٦) . فلاحظ هذه الخليطة في درجة الحرارة 250°C تقع في منطقة تجانس ، وعندها تكون هذه الخليطة مؤلفة من طور وحيد متجانس هو الطور السائل . وعند تبريد هذه الخليطة حتى النقطة 2 (درجة الحرارة تكون نحو 220°C) فإننا نجد أنه تحت هذه الدرجة من الحرارة بدأت بلورات القصدير النقية بالانفصال داخل المحلول السائل ، ولهذا نلاحظ أن الخليطة في النقطة c (درجة الحرارة تكون حوالي 190°C) تقع في منطقة عدم تجانس ومكونة من طورين أحدهما بلورات القصدير النقية (وتركيز هذا الطور يوافق مسقط النقطة d على محور التركيز أي 100% قصدير) ، وثانيهما المحلول السائل ذو التركيز المقابل لتركيز النقطة e (على محور التركيز طبعاً) . أما إذا أردنا معرفة كمية كل من هذين الطورين فإننا نطبق ما يسمى قانون العتلة وذلك إذا عددنا المستقيم الأفقي المار

من النقطة c عتلة نقطة ارتكازها هي النقطة c نفسها وتؤثر في طرفيها قوتان إحداها وزن الطور الصلب في النقطة d والثانية وزن الطور السائل في النقطة f ، فحتى تتوازن العتلة يجب أن يكون :

$$\text{الطور السائل} \times c f = \text{الطور الصلب} \times c d .$$

وسوف نتحدث فيما بعد عن صحة استخدام قانون العتلة هذا فيما يخص الخلاط المعدنية (أي كيف يتم استخدامه في حساب كميات الاطوار المشكلة للخليطة أو حساب تركيز الخليطة الأساسية إذا كانت معروفة كمية الاطوار ... الخ) . ولكن ما يهمنا الآن هو كيفية دراسة مخطط التوازن وماهي الاستنتاجات التي من الممكن الحصول عليها من هذه الدراسة . لهذا ولنعد قليلاً إلى الخليطة السابقة التي تحتوي على 20% بزموتاً و 80% قصديراً والتي بدأنا بدراسة مراحل تبريدها آنفاً ، نلاحظ أنه باستمرار تبريد هذه الخليطة تحت درجة الحرارة المطابقة للنقطة c تزداد بالتدريج نسبة البزموت في هذا السائل ، وإذا أخذنا عتلة أفقية في كل نقطة تصل إليها الخليطة أثناء تبريدها في منطقة عدم التجانس هذه وجدنا أن تركيز المحلول السائل ينزل على خط السيولة مبيّناً ازدياد نسبة البزموت في هذا السائل وباتجاه النقطة e . وعندما تصل الخليطة إلى الخط الأفقي ms يكون تركيز السائل المتبقي في البوتقة قد أصبح فعلاً مساوياً تركيز النقطة e ، ولهذا فإن هذا السائل المتبقي يكون مشبعاً بكلا المعدنين كما ذكرنا آنفاً وسوف يتجمد المعدنان المشكلان لهذا السائل (أي القصدير والبزموت) معاً وفي درجة حرارة ثابتة وقد أسمينا هذه الحادثة التفاعل اليوتكتيكي ، ولهذا يسمى المزيج الناعم من بلورات المعدنين المتداخلة والناجمة عن هذا التفاعل اليوتكتيكي .

وبهذا الشكل نستطيع دراسة أية خليطة من خلاط مجموعة القصدير

والبزموت سواء أكان ذلك أثناء تبريدها من الحالة السائلة إلى الدرجة العادية من الحرارة أم بالعكس أثناء تسخينها •

إن تبلور خلائط هذه المجموعة (وكما لاحظنا) يتم على مرحلتين : ففي المرحلة الأولى يتم انفصال بلورات من القصدير أو البزموت (وذلك حسب موقع الخليطة المراد دراستها بالنسبة للنقطة e) . ولقد أسسنا هذه البلورات البلورات الأولية (أو البنية الأولية) • أما في المرحلة الثانية فيتم تبلور كل من القصدير والبزموت معاً وذلك عندما تصل درجة الحرارة إلى درجة حرارة المستقيم الأفقي ms ويشكل هذا المزيج من بلورات المعدنين البنية الثانوية للخليطة • وتختلف نسبة كل من البنية الأولية والثانوية باختلاف تركيز الخليطة ونستطيع تقدير نسبة كل منهما في خليطة ما بتطبيق قانون العتلة من جهة وبرسم مخطط البنية (أو ما يسمى عادة بمخطط النسج) من جهة ثانية (انظر الشكل ٦ - ٦) • إذ يُبين هذا الشكل طريقة رسمه وكيفية استخدامه • ولرسم هذا المخطط نرسم مستطيلاً تحت مخطط التوازن بحيث يكون طول قاعدته مساوياً طول محور التركيز لمخطط التوازن كما يكون ارتفاعه كينياً ، بحيث نعتد طول الارتفاع مساوياً 100% من البنية الصلبة للخليطة • ويبين هذا المخطط البسيط أنه في مثل هذه المجموعة الخلائطية توجد ثلاث خلائط وحيدة البنية ، أي أن معدن القصدير النقي عند تجمده يتبلور بشكل بلورات أولية وكذلك الأمر بالنسبة لمعدن البزموت النقي • أما الخليطة ذات التركيز الموافق للنقطة e فبنيتها كلها هي بنية ثانوية ، وتناقض هذه البنية بشكل منتظم كلما ابتعدنا عن النقطة e سواء باتجاه القصدير أو باتجاه البزموت •

ولكي تكون دراستنا كاملة لمجموعة القصدير والبزموت فلا بد أن نتعرض لكيفية تطبيق قانون الطور (أي قانون جييس) على هذه المجموعة • فإذا عدنا إلى الخليطة التي قمنا بدراستها مسبقاً (انظر الشكل ٦ - ٦) وفي المجال الحراري بين

النقطة h والخط الأفقي ms نلاحظ أنه بتغير درجة حرارة الخليطة يبدأ اتصال بلورات القصدير النقية (كما ذكرنا آتقاً) وهذا يتطابق مع قانون جيبس ذلك لأن عدد درجات الحرية في هذه الحالة يكون مساوياً الواحد ، إذ يبلغ عدد المكونات 2 (القصدير + البزموت) وعدد الأطوار 2 (السائل + بلورات القصدير الأولية) ، وبتطبيق قانون جيبس نجد أن :

$$F = m - n + 1 = 2 - 2 + 1 = 1 \quad (6.1)$$

أما عندما يحدث تجمد كل من القصدير والبزموت معاً من السائل المتبقي (أي عندما يحدث التفاعل اليوتكتيكي) فلقد قلنا أن هذا التفاعل يحدث عند درجة حرارة ثابتة (أي أن عدد درجات الحرية في هذه الحالة يجب أن يساوي الصفر) . وبالفعل عندما يبدأ تجمد كلا المعدنين من السائل دفعة واحدة فإن عدد الأطوار عند درجة الحرارة هذه يكون مساوياً 3 (السائل + بلورات القصدير + بلورات البزموت) وعدد المكونات لا يزال مساوياً 2 (القصدير + البزموت) ، لهذا وبتطبيق قانون جيبس نجد أن :

$$F = m - n + 1 = 2 - 3 + 1 = 0 \quad (6.2)$$

إن فهمنا لمخططات التوازن يخولنا بالاضافة إلى معرفة التأثيرات الحرارية في الخلائط وتحديد لحظات ظهور أطوار جديدة ، يخولنا في كل لحظة من معرفة نسب الأطوار وتحديد تركيز كل منها وتغيراته ومعرفة التغيرات أو التفاعلات التي تحصل عند درجة حرارة ثابتة ، هذا بالاضافة إلى أنه يمكننا تقدير نسب العناصر الداخلة في تركيب الخليطة دون اللجوء إلى تحليلها كيميائياً وذلك بدراستها مجهرياً وتحديد نسب الأطوار الصلبة الموجودة فيها بعضها إلى بعض أو بالأحرى تحديد نسب النسج المختلفة بعضها إلى بعض . ولتسهيل هذه العملية يمكن

الاستعانة بمخطط النسيج المبين على الشكل (٦ - ٦) أو باستعمال قانون العتلة بشكله الصحيح والذي سنتحدث عنه لاحقاً .

٦ - ٤ - قانون العتلة واستخداماته في مخططات التوازن :

يحدث أثناء التبلور أن يتغير تركيز الأطوار الموجودة في الخليطة وكميتها ، إذ يؤدي تشكل البلورات الصلبة من السائل الى تغير تركيب السائل ، ويحدث أثناء التبلور أن تزداد كمية البلورات الصلبة بينما تنقص كمية السائل. ولقد بينا آنفاً أنه في نقطة ما من مخطط التوازن تكون عندها الخليطة مؤلفة من طورين فإنه يمكننا في هذه النقطة أن نحدد كلا من كمية هذين الطورين وتركيزهما ، ويستخدم لهذا الغرض قانون العتلة .

لنبدأ أولاً باستخدام قانون العتلة في تحديد تركيز الأطوار المشكلة للخليطة، ونأخذ على سبيل المثال الخليطة K من مخطط التوازن المبين على الشكل (٦-٧) وندرس مراحل تبريد هذه الخليطة من الحالة السائلة وماذا يحدث لهذه الخليطة أثناء تبريدها. فعند درجات الحرارة الاعلى من درجة حرارة النقطة 1 نلاحظ أن الخليطة مؤلفة من طور سائل وحيد متجانس لأن المعدنين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة، واهذا فإن نسبة كل من المكونين للخليطة تتحدد من خلال مسقط النقطة 1 على محور التركيز . أما عند التبريد لدرجات حرارة أقل من درجة حرارة النقطة 1 فإن بلورات المعدن B النقية تبدأ بالانفصال داخل المحلول السائل وعندها سوف يتغير تركيز السائل باتجاه ازدياد المكون A به . وعند درجة الحرارة t_1 (مثلاً) يتعين تركيز المكون B في السائل من خلال مسقط النقطة b على محور التركيز (أي النقطة b') أما تركيز المكون B في البلورات الصلبة B النقية فتتحدد أيضاً من خلال مسقط النقطة c على محور

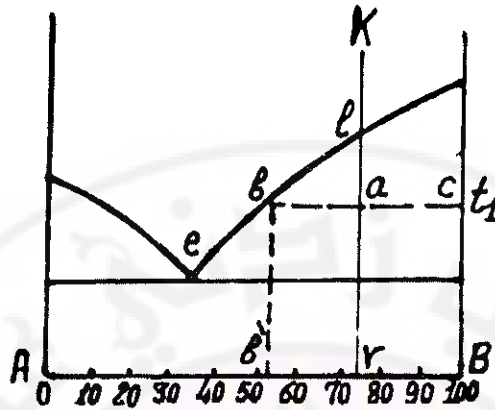
التركيز ونلاحظ من الشكل أن نسبة B في البلورات الصلبة تساوي (100%) وهذا صحيح لأنها بلورات من المكون B النقي .

ونلاحظ أنه بانخفاض درجة الحرارة يتغير تركيز السائل وفق المنحني t_e بينما تركيز الطور الصلب يبقى ثابتاً ، وهكذا حتى نصل إلى درجة حرارة التفاعل اليوتكتيكي فإن تركيز السائل يصبح مطابقاً لتركيز النقطة e ، ولقد علمنا سابقاً أنه لهذا السائل يحدث التفاعل اليوتكتيكي متحولاً إلى طورين صلبين عند درجة حرارة ثابتة . وبهذا الشكل يمكننا أن نخلص إلى النتيجة الأولى من قانون العتلة وهي :

لتحديد نسبة المكونات في الأطوار المشكلة للخليطة في نقطة ما من مخطط التوازن فالتا نمر من هذه النقطة خطاً أفقياً حتى يقطع حدود المنطقة الموجودة فيها النقطة في نقطتين ، وعندها فإن مسقط نقاط التقاطع هذه على محور التركيز وتحدد لنا تركيز الأطوار المشكلة للخليطة .

أما النتيجة الثانية في قانون العتلة والتي تختص في تحديد كمية كل طور من الأطوار المشكلة للخليطة فيمكن استنتاجها على الشكل التالي :

لنقم بدراسة الخليطة K نفسها وعند درجة الحرارة t_1 . نلاحظ من الشكل (٦ - ٧) أن الخليطة تحتوي على نسبة من المكون B تقدر بـ $(r\% B)$ ومن المكون A $(100 - r\% B)$. لهذا فإذا افترضنا محور التركيز كاملاً يعبر عن كمية الخليطة K فإن المستقيم rA يحدد كمية المكون B في الخليطة والمستقيم rB يحدد كمية المكون A في هذه الخليطة . ولقد عرفنا آنفاً أن الخليطة في النقطة a تتألف من الطور الصلب (ذي التركيز في النقطة B) والطور السائل (ذي التركيز في النقطة b') أي أن كمية المكون



الشكل (٦ - ٧) : استخدام قانون العتلة في مخطط التوازن

B في الطور السائل في هذه الحالة يحددها المستقيم Ab' . فإذا افترضنا أن كمية الخليطة كلها تساوي الواحد ، وأن كمية الطور الصلب في هذه الخليطة تساوي x وكمية الطور السائل تساوي $(1 - x)$ عندها تكون كمية المكون A الموجود في الطور السائل مساوية :

$$b' B (1 - x) = b' B - x b' B = r B \quad (6.3)$$

ومنه :

$$x b' B = b' B - r B$$

$$x = \frac{b' B - r B}{b' B} = \frac{b' r}{b' B} = \frac{b a}{b c} \quad (6.4)$$

من العلاقة (6.4) نلاحظ أنه إذا افترضنا كمية الخليطة مساوية الواحد . ويعبر عنها المستقيم bc فإن كمية الطور الصلب في هذه الخليطة عند النقطة a تساوي النسبة $(\frac{ab}{bc})$. ولهذا فإن كمية الطور السائل يمكن إيجادها بالعلاقة :

$$1 - x = 1 - \frac{b a}{b c} = \frac{b c - b a}{b c} = \frac{a c}{b c} \quad (6.5)$$

أي أن كمية الطور السائل في الخليطة عند النقطة a تساوي النسبة $(\frac{ac}{bc})$. ومنه فإن كمية الطور الصلب إلى كمية الطور السائل تحددها النسبة التالية :

$$\frac{x}{1-x} = \frac{ba \cdot bc}{bc \cdot ac} = \frac{ba}{ac} \quad (6.6)$$

وبهذا الشكل نخلص إلى النتيجة الثانية من قانون العتلة والتي تنص كما يلي:
لتحديد النسبة بين كمية طورين مشكّين لخليطة في نقطة ما من مخطط التوازن فإننا نمرر خطاً أفقياً بهذه النقطة حتى يتقاطع مع حدود المنطقة التي تحتوي على هذه النقطة في نقطتين ، وعندها فإن النسبة بين كمية الطورين تتناسب عكسياً مع النسبة بين المستقيمين الواصلين بين هذه النقطة ونقطتي التقاطع .

٦-٥ - مخططات التوازن النظرية :

تتعلق أشكال مخططات التوازن في الخلائط الثنائية بما يلي :

- أ - قابلية عناصر الخليطة للانحلال بعضها ببعض في الحالة السائلة .
- ب - قابلية عناصر الخليطة للانحلال بعضها ببعض في الحالة الصلبة ومدى هذه القابلية .
- ج - قابلية عناصر الخليطة للاتحاد لتشكيل مركب كيميائي أو مركب معدني .
- د - قابلية المركبات الكيميائية أو المعدنية المتشكلة لإذابة أحد عناصر الخليطة أو للذوبان فيه .

وبناءً على هذه الشروط آتفة الذكر يوجد عدد محدود من مخططات التوازن النظرية العامة على الرغم من كثرة مخططات التوازن التجريبية . فأي مخطط من مخططات التوازن التجريبية للخلائط إما أن يتفق مع أحد هذه المخططات النظرية

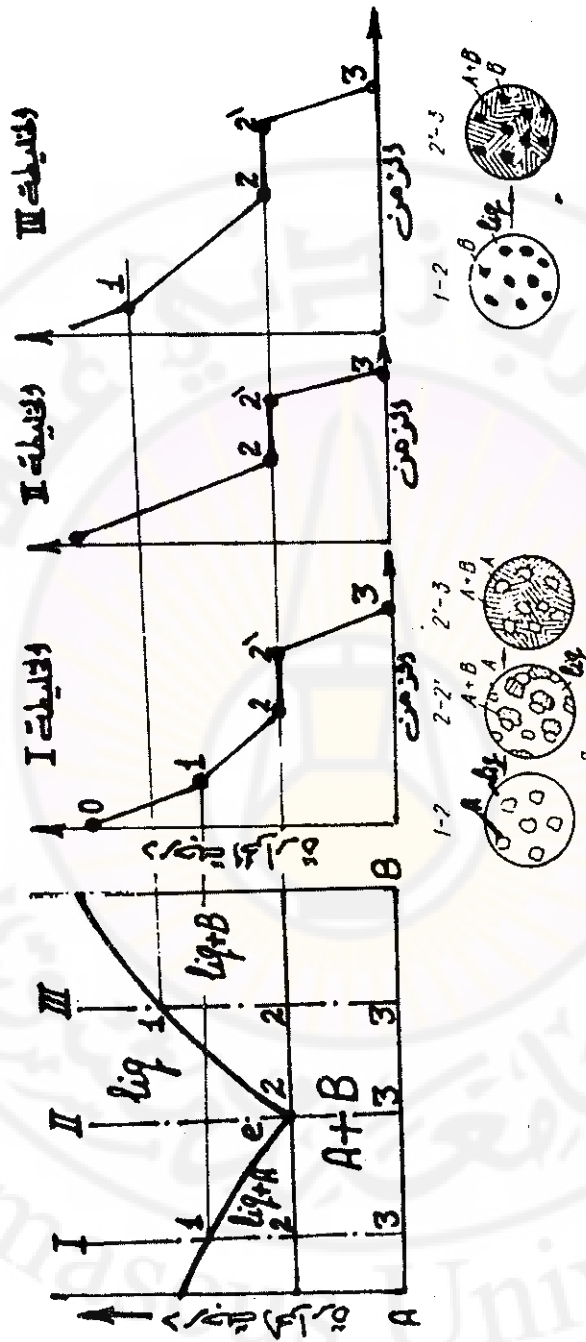
(أي أن يكون تكراراً لـ واحد المخططات النظرية) أو أن يجمع اثنين أو أكثر من تلك المخططات . ولكن هناك بعض الخلائط التي لا تشبه مخططات توازنها أيضاً من المخططات النظرية العامة ولا بأي شكل وعندها نستطيع القول أن هذه الخلائط تشكل حالات شاذة بل خاصة ولا تدل إلا على العينة أو الخليطة بذاتها . ولقد تمكن الباحثون في هذا المجال من حصر مخططات التوازن النظرية للخلائط الثنائية في سبعة مخططات هي التالية :

I - مخطط التوازن لخليطة مؤلفة من عنصرين قابلين للانحلال في بعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة وغير قابلين للذوبان مع بعضهما في الحالة الصلبة ولا يتحدان مع بعضهما لتشكيل أي مركب كيميائي أو معدني (ويسمى عادة مخطط التوازن للخليطة التي تشكل مزيجاً ميكانيكياً مؤلفاً من بلورات نقية من كلا العنصرين) .

لقد تعرفنا على هذا النوع من المخططات فيما سبق ودرسناه بالتفصيل وذلك عند تعرفنا على كيفية إنشاء مخطط التوازن لخليطة القصدير والبرصوت . غير أنه لا بد هنا من ذكر بعض الملاحظات الهامة عند دراستنا لهذا النوع من المخططات وهي :

١ - لا يوجد عادة معادن غير قابلة للذوبان (ولو بنسب ضئيلة جداً) ببعضها في الحالة الصلبة ، ولكن افترضنا هنا أن نسبة الذوبان الضئيلة جداً هذه مساوية الصفر هو من منطلق أكاديمي بحث أما في الحقيقة فإنه لا يمكننا أن نجزم أنه تتوافر خلائط معدنية تكون قابلة ذوبان المعدنين ببعضهما في الحالة الصلبة معدومة .

٢ - يمكننا أن نقوم بدراسة المراحل التي تمر بها العينة من خلال الخليطة الثنائية (أي ما يحدث فيها من اتصالات وتحولات) وذلك من خلال



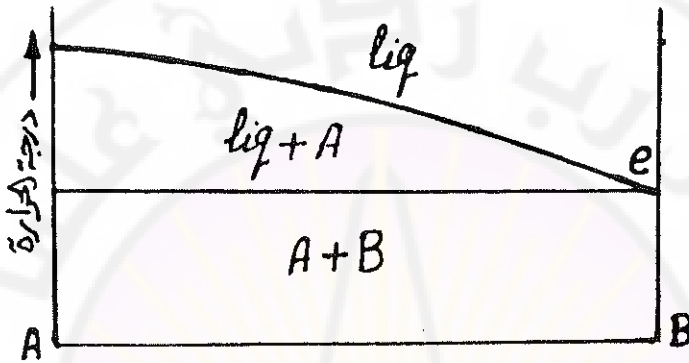
الشكل (٦ - ٨) : مخطط التوازن لخليطة تشكّل مزيج ميكانيكي مؤلف من بلورات
نقية للعنصرين ومنخفضات تبريد ثلاث عينات من هذه الخليطة

رسم منحنى تبريد هذه العينة والمستنتج من مخطط التوازن نفسه • فمثلا بين الشكل (٦ - ٨) منحنيات التبريد لثلاث عينات مختلفة نسب العنصرين فيها • فمن الشكل (٦ - ٨) نلاحظ أن دراسة منحنى تبريد الخليطة I (مثلا) تظهر لنا مايلي : يُبيّن الجزء (1 - 0) من منحنى التبريد كيف يبرد المحلول السائل ، أما الجزء (2 - 1) فيبين انفصال بلورات نقية من المعدن A ، وتظهر العتبة الأفقية (2' - 2) التفاعل اليوتكتيكي للسائل المتبقي (أي انفصال بلورات العنصرين A و B دفعة واحدة وعند درجة حرارة ثابتة) ، أما الجزء (3 - 2') فيظهر كيف تبرد القطعة الصلبة المتشكلة حتى درجة الحرارة العادية • وهكذا أيضا يقال عن أجزاء منحنى تبريد الخليطة III إلا أن البلورات المنفصلة في هذه الحالة هي بلورات نقية من العنصر B . أما منحنى تبريد الخليطة II والتي يطابق تركيزها تركيز النقطة اليوتكتيكية فانه يظهر أن كامل السائل يتحول إلى طورين صلبين دفعة احدة (تفاعل يوتكتيكي) دون أن يسبق هذا التفاعل انفصال بلورات لأي من العنصرين •

٣ - إن بنية أي خليطة تصبح درجة حرارتها أقل من درجة حرارة خط التفاعل اليوتكتيكي مؤلفة من طورين (بلورات A و B النقية) ، ولكن على يسار النقطة اليوتكتيكية تكون بنية الخليطة مؤلفة من عنصري بنية هما : بلورات A النقية (التي انفصلت في البداية من السائل) والمزيج اليوتكتيكي (A + B) الناتج عن التفاعل اليوتكتيكي ، وتسمى هذه الخلائط الهيبويوتكتيكية • أما على يمين النقطة اليوتكتيكية فان بنية الخليطة مؤلفة من عنصري بنية أيضا هما : بلورات B النقية والمزيج اليوتكتيكي (A + B) ، وتسمى هذه الخلائط الخلائط الهيبويوتكتيكية •

٤ - هناك حالات ولو أنها نادرة تكون فيها نقطة اليوتكتيك في أحد طرفي

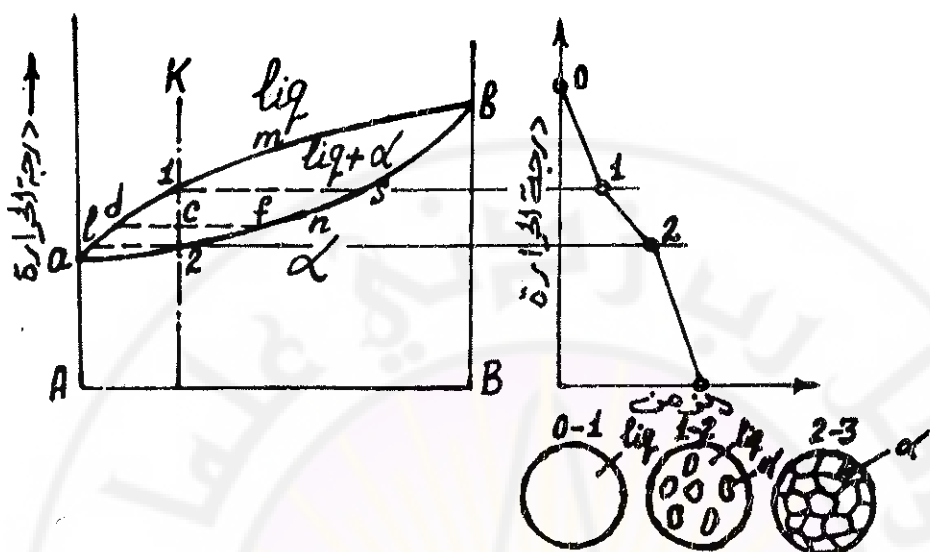
مخطط التوازن (انظر الشكل ٦ - ٩) . وفي هذه الحالة يكون تركيب اليوتكتيك ودرجة تجمده هما نفس تركيب ودرجة تجمد المعدن ذي درجة التجمد الاخفض . وعند انتهاء التجمد نجد أن بلورات المعدن ذي درجة الانصهار الاعلى مغلفة ببلورات المعدن الثاني التي تملأ الفراغات التي تركتها الاولى بعد تجمدها .



الشكل (٦ - ٩) : حالة خاصة لمخطط التوازن تبين أن تركيب اليوتكتيك ودرجة تجمده هما نفس تركيب ودرجة تجمد المعدن ذي درجة التجمد الاخفض .

II - مخطط التوازن لخليطة مؤلفة من عنصرين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالتين السائلة والصلبة ولا يتحدان مع بعضهما لتشكيل أي مركب كيميائي أو معدني (ويسمى عادةً مخطط التوازن للخلائط التي يكون الذوبان فيها في الحالة الصلبة ذوباناً غير محدود) .

إذا كان العنصران يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالتين السائلة والصلبة فإنه من الممكن في هذه الحالة أن يتواجد فقط طوران هما : الطور السائل (liq) والمحلول المعدني الصلب (s) ، وبالتالي فإنه لا يمكن أثناء تبريد الخليطة من الحالة السائلة الى درجة الحرارة العادية أن تتواجد ثلاثة أطوار في الوقت نفسه، وهذا يعني أنه لن يحصل تجمد عند درجة حرارة ثابتة (كما في المخطط السابق) أي أنه لن يكون هناك خطوط أفقية على مخطط التوازن .



الشكل (٦ - ١٠) : مخطط التوازن للخلائط التي يكون الذوبان فيها في الحالة الصلبة ذوبانا غير محدود ومنحني التبريد لعينة من مخطط التوازن .

يتألف المخطط المبين على الشكل (٦ - ١٠) من ثلاث مناطق : الأولى وتحتوي على السائل (liq) والثانية وتحتوي على السائل وبلورات من المحلول المعدني الصلب (liq + α) ، والثالثة وتحتوي على المحلول المعدني الصلب (α) فقط . ويسمى الخط a m b خط السيولة بينما يسمى الخط a n b خط التجمد . ويظهر منحني التبريد المبين على الشكل (٦ - ١٠) مراحل تبريد عينة على مخطط التوازن ، حيث تبين النقطة 1 بداية التبلور والنقطة 2 انتهاء التبلور ، وما بين النقطتين 1 و 2 (أي فيما بين خطي السيولة والتجمد) تكون الخليطة مؤلفة من طورين (صلب + سائل) . وعندما تكون المجموعة المشكلة من عنصرين مؤلفة من طورين فقط في الوقت نفسه فإن هذه المجموعة تكون أحادية التغير ومن قانون الطور (أو قانون جيبس) نجد أن :

$$F = m - n + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$$

(6.7)

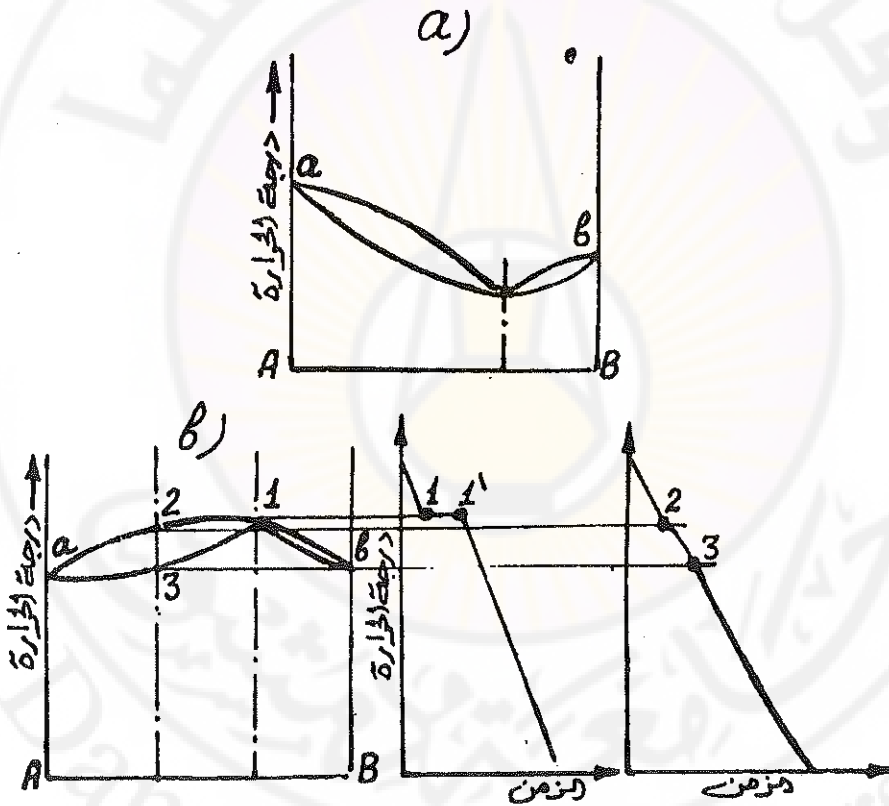
وهذا يعني أنه إذا تغيرت درجة الحرارة فإن نسبة العنصرين في كل من الطورين تتغير مع تغير كمية كل من الطورين ، وعند كل درجة حرارة يكون تركيب الطورين محدداً تماماً .

يمكن استخدام قانون العتلة في تحديد نسبة كل من الطورين في الخليطة وتركيزهما وذلك في المجال الحراري بين خطي السيولة والتجمد . فمثلاً تتألف الخليطة K في النقطة c من طورين صلب وسائل ، ويتحدد تركيب الطور السائل من خلال مسقط النقطة d الموجودة على خط السيولة على محور التركيز ، أما تركيب الطور الصلب فيتحدد من خلال مسقط النقطة e الموجودة على خط التجمد على محور التركيز ، أما كمية كل من الطورين السائل والصلب فتتحدد من النسب : $(\frac{cf}{df})$ و $(\frac{dc}{df})$ على الترتيب .

ومن الجدير ذكره هنا أنه في مجال التبلور (أي من النقطة 1 وحتى النقطة 2) فإنه تنفصل من الخليطة السائلة التي يطابق تركيبها النقطة K بلورات أكثر غنى بالعنصر ذي درجة حرارة الانصهار الأعلى (أي العنصر B في هذه الحالة) . ويتحدد تركيب البلورات الأولية من خلال مسقط النقطة s على محور التركيز ، وينتهي تبلور الخليطة K في النقطة 2 وذلك عندما تتجمد آخر قطرة من السائل الذي تركيبه في النقطة 1 . ومن الشكل (٦ - ١٠) نلاحظ أن الذراع الذي يحدد كمية الطور الصلب يساوي الصفر في النقطة 1 (أي في لحظة بدء انفصال البلورات) بينما يصبح هذا الذراع مساوياً الذراع الكلي للخليطة في النقطة 2 (أي في لحظة انتهاء تجمد كامل السائل) . ومن الشكل نلاحظ أيضاً أن تركيز السائل يتغير وفق المنحني (1 - 1) بينما يتغير تركيز البلورات الصلبة وفق المنحني (2 - S) .

الحالات الخاصة لمخطط التوازن :

إن الحالات الخاصة لمخطط التوازن آتف الذكر تتلخص في كون خط السيولة يتمتع بنهاية عظمى أو نهاية صفرى وعندها فإن الخطين (خط السيولة وخط التجمد) سيلتقيان في نقطة واحدة (أي في النقطة التي تشكل النهاية العظمى أو الصفرى - انظر الشكل ٦ - ١١) .



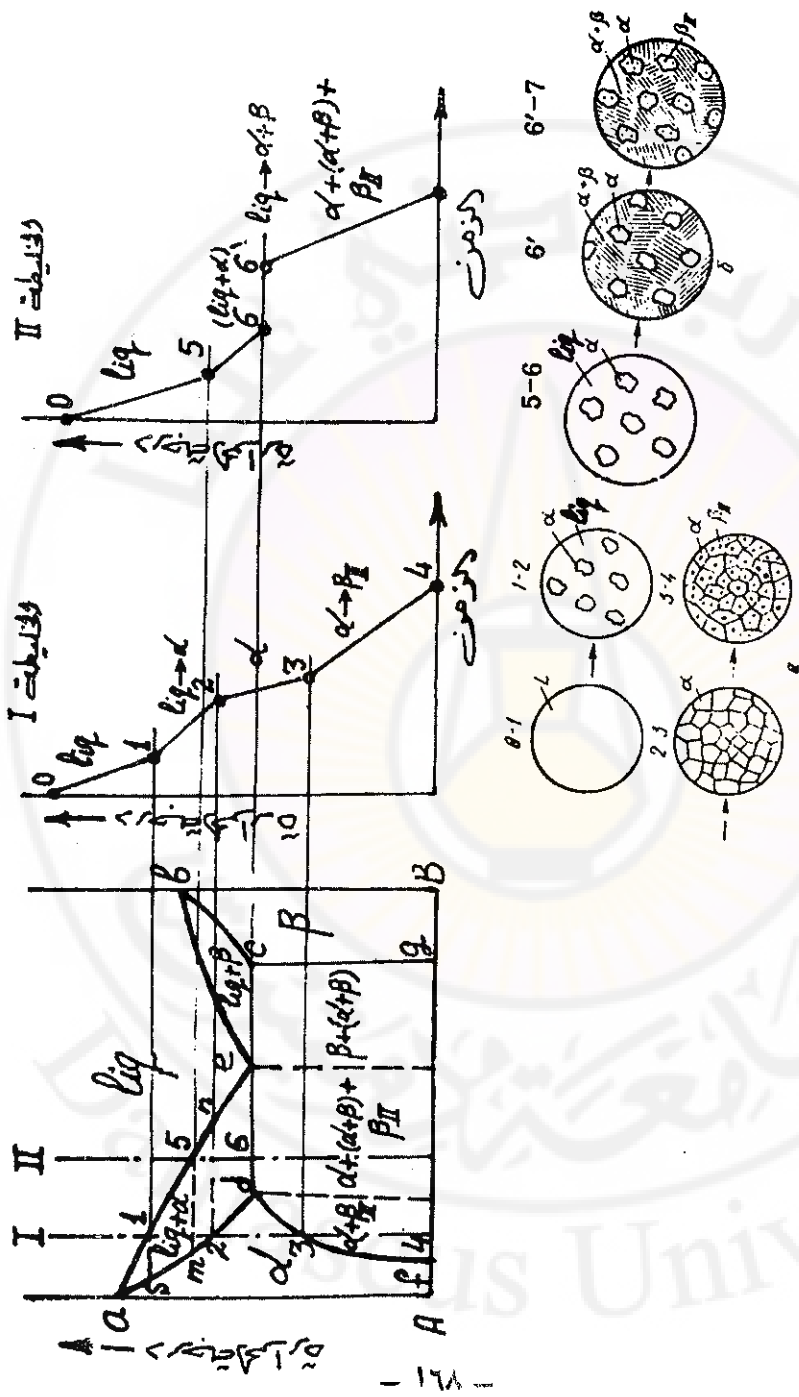
الشكل (٦ - ١١) : مخطط التوازن للخلائط التي يكون الذوبان فيها في الحالة الصلبة ذوبانا غير محدود ولكن خط السيولة يتمتع إما بنهاية صفرى (a) او عظمى (b) ومنحنيات التبريد لخليطين من المخطط .

ولا تختلف دراسة هذه المخططات عن المخطط السابق إلا أن العينات التي يكون تركيزها على المخطط هو تركيز النهاية الصغرى (شكل ٦ - ١١ a) أو تركيز النهاية العظمى (شكل ٦ - ١١ b) فإنه يتم تجيدها في درجة حرارة ثابتة كما يتجمد المعدن النقي (انظر منحني التبريد) ، وهذا يعني أنه في الحالة الصلبة نحصل دائما على محلول معدني صلب متجانس (أي أن العينات تكون دائما وحيدة الطور في الحالة الصلبة) •

III - مخطط التوازن للخليطة مؤلفة من عنصرين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة وبشكل محدود في الحالة الصلبة ولا يتحدان مع بعضهما لتشكيل أي مركب كيميائي أو معدني والفرق بين درجتي انصهارهما قليل (ويؤسسى عادةً مخطط التوازن من النوع اليوتكتيكي للخلائط التي يكون الذوبان فيها محدودا في الحالة الصلبة) •

من الممكن أن يتواجد في الخلائط التي من هذا النوع كل من : الطور السائل - المحلول المعدني الصلب « (وهو ذوبان ذرات العنصر B في الهياكل الشبكية للعنصر A) - المحلول المعدني الصلب β (وهو ذوبان ذرات العنصر A في الهياكل الشبكية للعنصر B) • ومن الممكن أن يكون هناك أكثر من حالة توازن وذلك عندما تتواجد ثلاثة أطوار في الوقت نفسه هي : liq و α و β •

ولا يتشكل أثناء التبريد أطوار تحتوي على بلورات نقية لأي من عنصري الخليطة وإنما يفصل من السائل بلورات لمحلول معدني صلب (« أو β) • ولهذا فإن المنطقة التي تقع بالقرب من الخط الشاقولي Aa هي المنطقة التي تحتوي على المحلول المعدني الصلب « والمنطقة التي تقع بالقرب من الخط الشاقولي Bb هي المنطقة التي تحتوي على المحلول المعدني الصلب β ويبيّن الخط df النسبة الحدية لذوبان العنصر B في الهياكل الشبكية للعنصر A ، بينما يبيّن



الشكل (٦ - ١٢) : مخطط التوازن من النوع البورتندي للخلائط التي يكون التوازن فيها محدودا في الحالة الصلبة ومنحنيات التبريد لمئينين من هذا المخطط .

الخط cg النسبة الحدية لذوبان العنصر A في الهياكل الشبكية للعنصر B . وما بين الخطين cg و df تكون البنية النهائية للخليطة مؤلفة من أكثر من طور.

يسمى الخط aeb خط السيولة والخط $adcb$ خط التجمد. ويمكننا ومن خلال معرفتنا الجيدة لكل من قانون الطور وقانون العتلة أن نتبع مراحل تبريد أي عينة على مخطط التوازن. ولهذا سوف نقوم فيما يلي بدراسة مراحل تبريد العييتين I و II على مخطط التوازن.

العينة I : تكون الخليطة في الحالة السائلة عند درجات الحرارة الأعلى من درجة حرارة النقطة 1 ، وتبدأ عملية التبلور عند النقطة 1 بانفصال بلورات المحلول المعدني الصلب α حيث يتغير تركيزه وفق المنحني $(2-s)$ ، أما تركيز السائل فيتغير وفق المنحني $(1-n)$. وتنتهي عملية التبلور في النقطة 2 وذلك بالحصول على بلورات من المحلول المعدني الصلب α الذي يتمتع بتركيز مطابق لتركيز الخليطة الأساسية. ولن تخضع هذه البلورات لأي تحولات أو انفصالات حتى النقطة 3 الواقعة على الخط df ، فعند درجات الحرارة الأقل من درجة حرارة النقطة 3 يصبح المحلول المعدني الصلب α مشبعاً وتبدأ بلورات مشابهة لبلورات المحلول المعدني الصلب β بالانفصال عنه. ولهذا يمكننا أن نستخدم في المنطقة الواقعة تحت الخط df قانون العتلة لخليطة مكونة من طورين α و β .

يتغير تركيز المحلول المعدني الصلب α وفق المنحني $(4-3)$ وذلك بسبب انفصال بلورات β ذات التركيز في النقطة g . وتزداد كمية بلورات β باستمرار تبريد العينة، وتستخدم المسافات الواقعة بين الخط الشاقولي I والمنحني $(4-3)$ في تحديد كمية بلورات β المنفصلة عند أي درجة حرارة

نريد • ويبيّن لنا الشكل (٦ - ١٢) منحني تبريد العينة I وكيفية تشكل بلورات المحلول المعدني الصلب « وكيفية انفصال بلورات β منه •

تسمى بلورات β المنفصلة من بلورات « البلورات الثانوية ويرمز لها بالرمز β_{II} وذلك لتسييزها عن بلورات β_I المنفصلة من السائل مباشرة مع

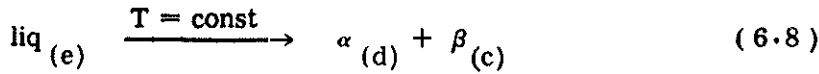
العلم أن كليهما يتمتع بالتركيب نفسه • ويجب أن ننوه هنا الى مايلي :

١- إن أي خليطة يقع تركيزها على يسار الخط df لا تحتوي على بلورات β الثانوية •

٢- إن وجود الخط cg على مخطط التوازن شاقولياً يعني أن ذوبان العنصر A في الهياكل الشبكية للعنصر B لا يتعلق بدرجة الحرارة - أي أنه لن يحدث انفصال بلورات من النوع « بانخفاض درجة الحرارة ، ويسكن أن يحدث مثل هذا النوع من الانفصالات لو كان الخط cg يتسع بشكل مشابه المخط df (أي لو كان الخط cg مائلاً نحو اليسار على مخطط التوازن) •

٣- تحدد النقطة d أعلى نسبة ذوبان للعنصر B في الهياكل الشبكية للعنصر A •

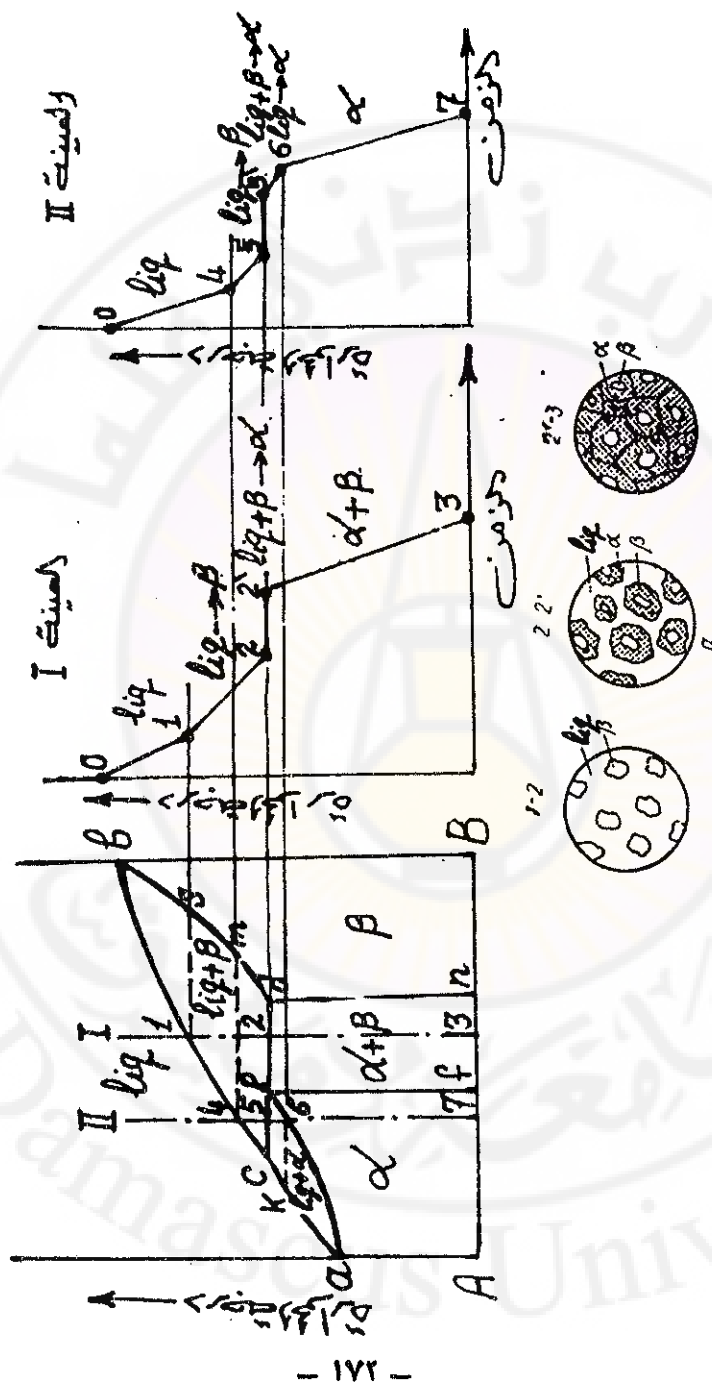
العينة II : عند تبريد هذه العينة وابتداءً من النقطة 5 يبدأ انفصال بلورات « ، وعند الوصول الى النقطة 6 (أي الى الخط الافقي dcc) تصبح المجموعة محتوية على ثلاثة أطوار (الطور السائل الذي يطابق تركيزه تركيز النقطة e ، وبلورات « ذات التركيز في النقطة d ، وبلورات β ذات التركيز في النقطة c) وعند ذلك يحدث التفاعل اليوتكتيكي ومن السائل يفصل دفعة واحدة وعند درجة حرارة ثابتة طوران صلبان وذلك وفق التفاعل التالي :



وهكذا وباتتهاء تبلور العينة II فإن بنيتها تحت الخط $d e c$ مباشرة تصبح مؤلفة من بلورات « التي تم انفصالها بين النقطتين 5 و 6 والمزيج اليوتكتيكي $(\alpha + \beta)$. ولكن وباستمرار تبريد العينة يتغير تركيز بلورات « (سواء بلورات « الاولى أو بلورات « الموجودة في المزيج اليوتكتيكي) وذلك بسبب انفصال بلورات β_{II} منها . ونود هنا أن نوه الى أن بلورات β_{II} المنفصلة داخل المزيج اليوتكتيكي لا يمكن تمييزها بالفحص المجهرى وذلك بسبب اتحادها مع بلورات β الماثلة لها بالتركيب وفي المزيج نفسه .

IV - مخطط التوازن لخليطة مؤلفة من عنصرين يدوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة وبشكل محدود في الحالة الصلبة ولا يتحدان مع بعضهما لتشكيل أي مركب كيميائي أو معدني والفرق بين درجتي انصهارهما كبير (ويسمى عادةً مخطط التوازن من النوع البيرتكتيكي للخلائط التي يكون الذوبان فيها محدودا في الحالة الصلبة) .

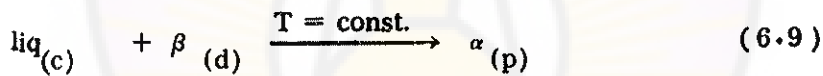
لقد تبين لنا سابقا أن التحول اليوتكتيكي يعني تحول الطور السائل الى طورين صلبين عند درجة حرارة ثابتة . ولكن هناك إمكان لحدوث تحول من نوع آخر في مخططات التوازن ، إذ يحدث هذا التحول عندما تتواجد ثلاثة أطوار في حالة التوازن أيضا حيث يتفاعل السائل مع البلورات الاولى التي انفصلت لتوها منه معطياً بلورات من نوع جديد ، ويحدث هذا التفاعل عند درجة حرارة ثابتة ويسمى التفاعل البيرتكتيكي . ويبيّن الشكل (٦ - ١٣) مخطط التوازن من النوع البيرتكتيكي ، ونجد على هذا المخطط ثلاث مناطق أحادية الطور هي : liq و α و β وثلاث مناطق مزدوجة الطور هي : $(\text{liq} + \beta)$ و $(\text{liq} + \alpha)$ و $(\alpha + \beta)$.



الشكل (١٣ - ٩) : مخطط التوازن من النوع البيروكتيني للخلائط التي يكون اللويبان فيها محدودا في الحالة الصلبة ومنحنيات التبريد لميكتين من مخطط التوازن .

ويُسمى الخط acb خط السيولة والخط $apdb$ خط التجمد ، ولفهم طبيعة هذا النوع من مخططات التوازن نقوم فيما يلي بدراسة مراحل تبريد عيتين منه كمايلي :

العينة I : يبدأ تبلور العينة في النقطة 1 وذلك عندما تبدأ بلورات المحلول المعدني الصلب β وذات التركيز في النقطة s بالاتصال من المحلول السائل . بعد ذلك وبانخفاض درجة الحرارة يتغير تركيز السائل وفق خط السيولة من النقطة 1 وحتى النقطة c ، أما تركيز المحلول المعدني الصلب β فيتغير وفق خط التجمد من النقطة s وحتى النقطة d . وعند وصول درجة حرارة الخليطة I الى خط التفاعل البيريكتيكي يصبح تركيز السائل مطابقاً للنقطة c وتركيز الصلب مطابقاً للنقطة d ، عندها يتفاعل هذان الطوران مع بعضهما عند درجة حرارة ثابتة معطيان طوراً جديداً هو α ذو التركيز في النقطة p (وهي النقطة الثالثة على الخط الافقي) :



من الشكل (٦ - ١٣) نلاحظ أن النقطتين p و d تظهران نسبة التركيز الحدية لكل من الطورين α و β ، ولا تتغير هذه النسبة الحدية حتى درجة الحرارة العادية ذلك لأن الخطين pd و cn شاقوليان . ومن الشكل (٦ - ١٣) نلاحظ أن النسبة بين كمية الطورين المشاركين في التفاعل البيريكتيكي والمعطيين الطور α يسكن ايجادها باستخدام قانون العتلة وذلك وفق مايلي :

$$\frac{cp}{pd} = \frac{\text{كمية الطور الصلب } \beta}{\text{كمية الطور السائل } liq} \quad (6.10)$$

وبمعنى آخر فإن هذه النسبة هي النسبة الواجب توافرها حتى يتشكل الطور

« . ولكن وفيما يخص الخليطة I نلاحظ أن النسبة بين كمية الطور الصلب β الى كمية الطور السائل تتحدد بالعلاقة التالية :

$$\frac{c_2}{2d} = \frac{\beta}{\text{كمية الطور السائل}} \quad (6.11)$$

وهذا يعني أن هذه الخليطة تحتوي على كمية زائدة من الطور الصلب β وذلك بالمقارنة مع كمية هذا الطور اللازمة لتشكيل الطور « عادةً . لهذا وعند انتهاء التفاعل البيرتكتيكي تبقى لدينا بلورات من الطور الصلب β لم تدخل في التفاعل ، أي أن البنية النهائية لهذه الخليطة سوف تحتوي على بلورات « (الناجمة عن التفاعل البيرتكتيكي) وبلورات β الزائدة عن حاجة هذا التفاعل . أما عندما يكون تركيز العينة مطابقاً للنقطة p فإن النسبة بين كمية الطور الصلب β والطور السائل هي النسبة الضرورية والكافية لتشكيل بلورات الطور « ذي التركيز الحدي .

العينة II : يتلخص وجه الاختلاف بين تبلور هذه الخليطة وتبلور الخليطة I في كون الخليطة II تحتوي عند درجة حرارة التفاعل البيرتكتيكي على كمية زائدة من الطور السائل وذلك بالمقارنة مع كمية الطور السائل اللازم لهذا التفاعل وتشكيل الطور « ذي التركيز في النقطة p . ولهذا فإن التحول البيرتكتيكي ينتهي باختفاء المحلول المعدني الصلب β ونحصل من هذا التفاعل على الطور « وكمية السائل الزائدة عن حاجة هذا التفاعل . وباستمرار التبريد بين النقطتين 5 و 6 يستمر تحول السائل الى البلورات « ، أي أنه عند درجة الحرارة الأقل من النقطة 6 تصبح بنية الخليطة مؤلفة من المحلول المعدني الصلب « فقط . ومن الشكل (٦ - ١٣) نلاحظ أنه عندما يتحول السائل المتبقي الى الطور « فإن تركيزه يتغير وفق المنحني (c - K) أما تركيز بلورات «

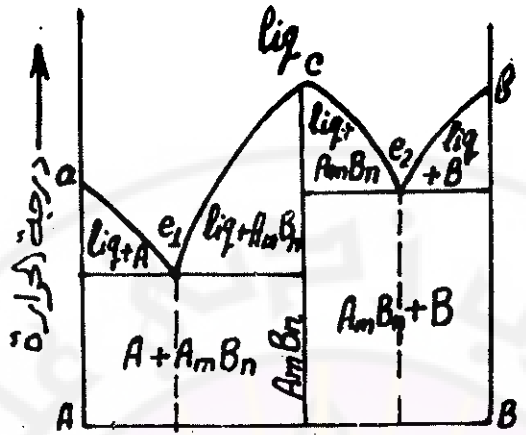
المشكلة منه فيتغير وفق المنحني (p - 6)

v - مخطط التوازن لخليطة مؤلفة من عنصرين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة ولا يذوب أي منهما في الآخر في الحالة الصلبة ولكنهما يتحدان مع بعضهما مشكلين مركبا ينصهر عند درجة حرارة ثابتة وغير قابل للذوبان في أي من عنصري الخليطة أو اذا بتنها (ويسمى عادةً مخطط التوازن للخلائط التي تشكل مركبا كيميائيا مستقرا) •

يتميز المركب الكيميائي وكما أوضحنا سابقا بنسبة محددة من كل من العنصرين المشكلين لهذا المركب ، وينعكس هذا على مخطط التوازن على شكل مستقيم شاقولي يمر من محور التركيز في نقطة تحدد نسبة كل من العنصرين في المركب الكيميائي • فاذا كان العنصران A و B يشكلان مركبا كيميائيا $A_m B_n$ فان هذا يعني أن المركب يحتوي على m ذرة من A و n ذرة من B - أي أن نسبة الذرات المحددة توافقها نسبة محددة في الكتلة •

ويعد المركب الكيميائي مستقرا اذا أمكن تسخينه حتى درجة حرارة الانصهار دون أن يتفكك قبل وصوله هذه الدرجة • ولنفرض أنه لدينا عنصران يشكلان مركبا كيميائيا وجيدا ومستقرا هو $A_m B_n$ وأن كلا من المركب الكيميائي والعنصرين لا يشكل في الحالة الصلبة أية محاليل صلبة فيما بينها فان مخطط التوازن يكون كما هو موضح على الشكل (٦ - ١٤) •

يشكل العنصران A و B مكوني المجموعة ، أما الاطوار الصلبة فهي A و $A_m B_n$ و B . إن انصهار المركب الكيميائي عند درجة حرارة ثابتة يتفق مع قاعدة الطور ، إذ يمكننا أن نعد هذا المركب مجموعة مؤلفة من مكون واحد وعندها فان :

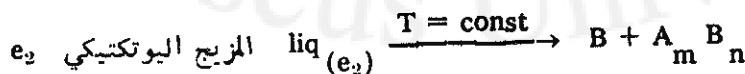
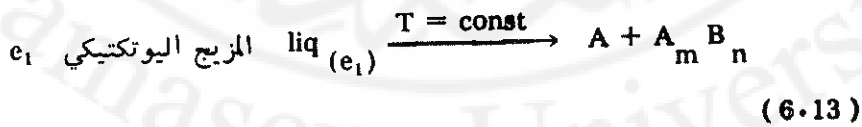


الشكل (٦ - ١٤) : مخطط التوازن الذي يحتوي على مركب كيميائي مستقر

$$F = m - n + 1 = 1 - 2 + 1 = 0 \quad (6.12)$$

نلاحظ من الشكل (٦ - ١٤) أن الخط الشاقولي الذي يثبّت النسبة التي تكون عندها المركب الكيميائي يقسم مخطط التوازن الى مخططين من النوع اليوتكتيكي الاول ، والواقع أنهما مستقلان عن بعضهما . فالقسم اليساري من المخطط هو مخطط توازن لخليطة عناصرها هما المعدن A والمركب $A_m B_n$ ، أما القسم الأيمن منه فهو مخطط توازن للمعدن B والمركب $A_m B_n$. وتصرف المركب $A_m B_n$ في كل من جزئي المخطط هو تصرف أي معدن صاف من حيث تجانس البلورات وتشكل اليوتكتيك . ونود هنا أن ننوه الى مايلي:

١- إن كلا من المزيج اليوتكتيكي e_1 و e_2 ينتجان من التفاعلين التاليين :



٢ - يبدأ انفصال البلورات الاولى من المركب الكيميائي $A_m B_n$ على كل من الخطين $e_1 c$ و $e_2 c$. ولهذا فان البنية النهائية للخلائط الهيروتكتيكية في القسم الايسر من مخطط التوازن والخلائط الهيويوتكتيكية في القسم الايمن من المخطط تتألف في حالتها الصلبة من بلورات المركب الاولى والمزيج اليوتكتيكي e_1 أو e_2 .

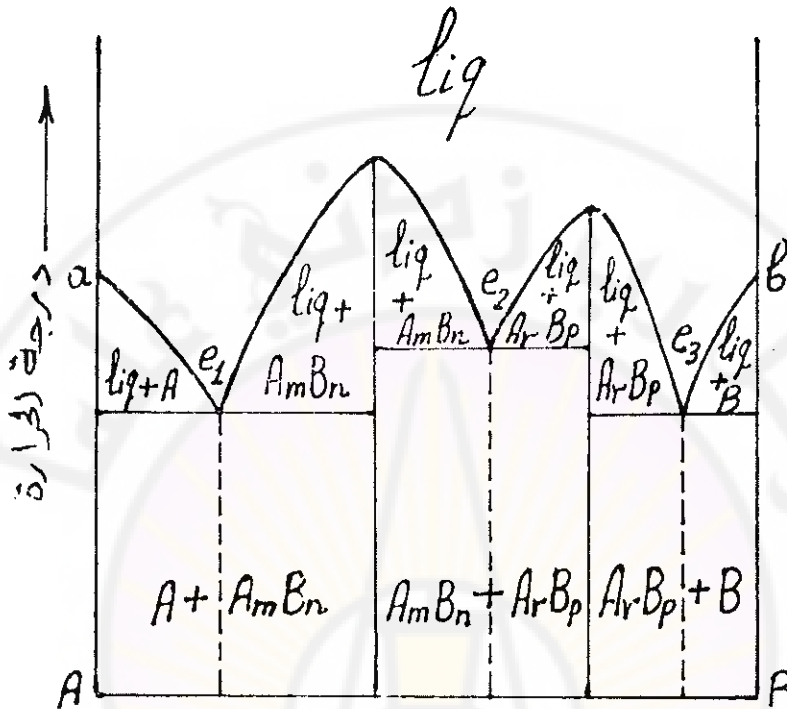
٣ - إن النسبة على محور التركيز عند الخط الشاقولي $A_m B_n - c$ هي النسبة بين كتلة كل من مكوني المركب الكيميائي • ولايجاد النسب الذرية للمكونين من خلال النسب الكتلية تستخدم العلاقتان التاليتان :

$$\alpha = \frac{a B_1}{a B_1 + b A_1} \cdot 100 \quad (6.14)$$

$$\beta = \frac{b A_1}{b A_1 + a B_1} \cdot 100 \quad (6.15)$$

حيث : a و b - النسبة الكتلية للمكونين A و B في المركب •
 A_1 و B_1 - الوزن الذري للمكونين A و B •
 α و β - النسبة الذرية للمكونين في المركب •

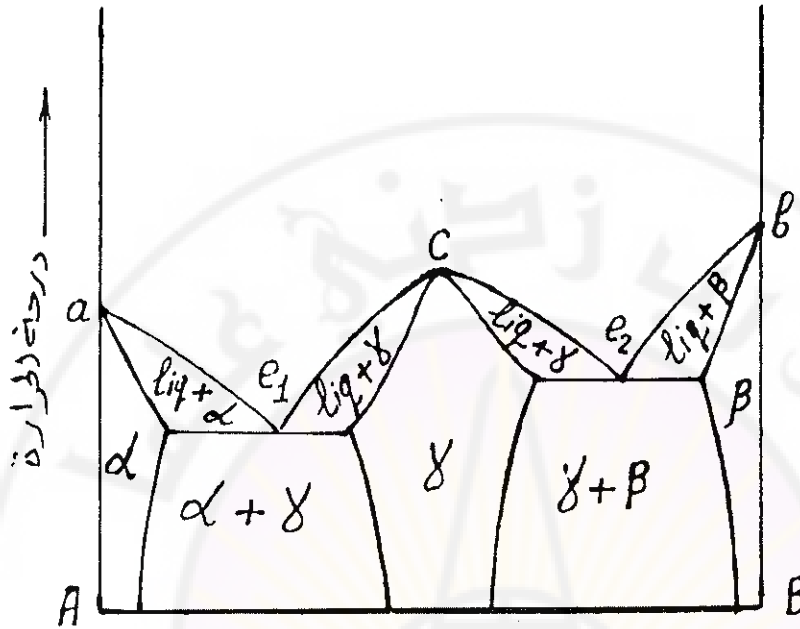
٤ - اذا كان العنصران A و B يشكلان فيما بينهما مركبين كيميائيين أو ثلاثة أو أربعة ... الخ فان مخطط التوازن يتألف في هذه الحالة من ثلاثة مخططات أو أربعة (أو أكثر من ذلك) من مخططات التوازن البسيطة (أي مخططات التوازن من النوع اليوتكتيكي الاول - انظر الشكل ٦-١٥) •



الشكل (٦ - ١٥) : مخطط توازن يحتوي على مركبين كيميائيين مستقرين .

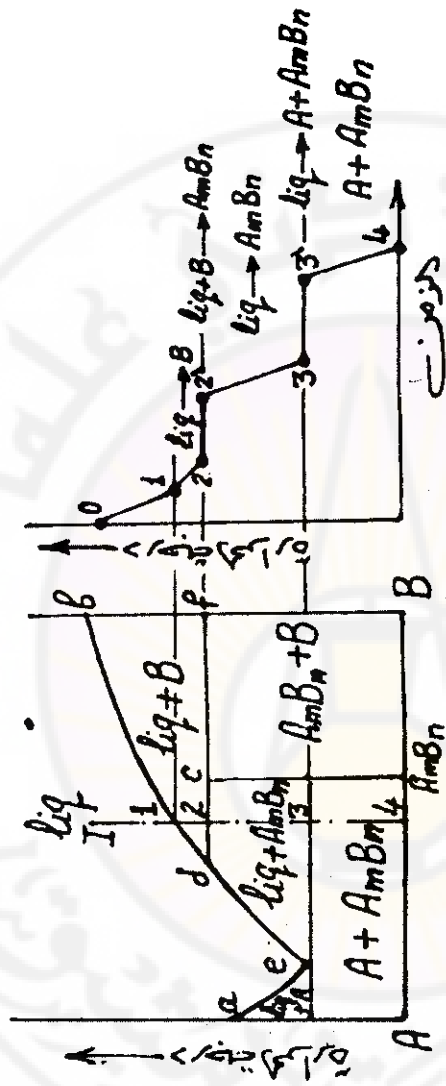
حالة خاصة :

إذا كان العنصران A و B يذوبان ببعضهما بشكل محدود في الحالة الصلبة ويشكلان أيضاً محلولاً صلباً قاعدته المركب الكيميائي ويستطيع هذا الأخير أن يذيب نسبة معينة من كلٍّ من المحلولين الصليين الأولين فإن مخطط التوازن يبدو كما هو موضح على الشكل (٦ - ١٦) . فمن هذا الشكل نلاحظ أن المحلولين الصليين α و β قاعدتهما العنصران A و B : أما المحلول الصلب γ فقاعدته المركب المعدني $A_m B_n$.



الشكل (٦ - ١٦) : مخطط توازن يحتوي على محلول صلب قاعدته المركب الكيميائي.

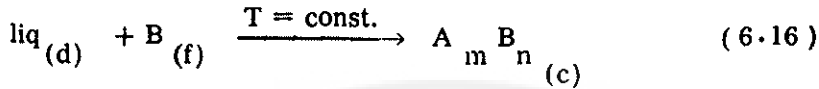
VI - مخطط التوازن لخليطة مؤلفة من عنصرين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة ولا يذوب أي منهما في الآخر في الحالة الصلبة ويتحدان مع بعضهما لتشكيل مركب كيميائي لا ينصهر عند درجة حرارة ثابتة وإنما في مجال حراري معين (ويسمى عادة مخطط التوازن للخلائط التي تشكل مركباً كيميائياً غير مستقر).
إن وجه الاختلاف بين مخططي التوازن للخلائط التي تشكل مركباً كيميائياً مستقراً والأخرى التي تشكل مركباً كيميائياً غير مستقر (وكما هو واضح من الشكل ٦ - ١٧) ينحصر في أن تسخين المركب الناتج من الأخيرة إلى درجة حرارة معينة (t_1) يسبب تحول هذا المركب إلى سائل وبلورات لعنصر من عنصري الخليطة - أي أن هذا المركب لا ينصهر بكامله عند هذه الدرجة من الحرارة. وكما عرفنا من المخططات السابقة فإن الخط الأفقي $d c f$ يعني تواجد



الشكل (٦-١٧) : مخطط توازن يحتوي على مركب كيميائي غير مستقر ومنحنى تبريد لعينة من هذا المخطط

ثلاثة أطوار في حالة التوازن في هذا المخطط هي : الطور السائل الذي تركيزه في النقطة d وبلورات العنصر B التي تركيزها في النقطة f وبلورات المركب الكيميائي التي تركيزها في النقطة c . فعند تسخين المركب الكيميائي $A_m B_n$ إلى درجة حرارة الخط $d c f$ فإنه يتفكك متحولاً إلى سائل تركيزه في النقطة d

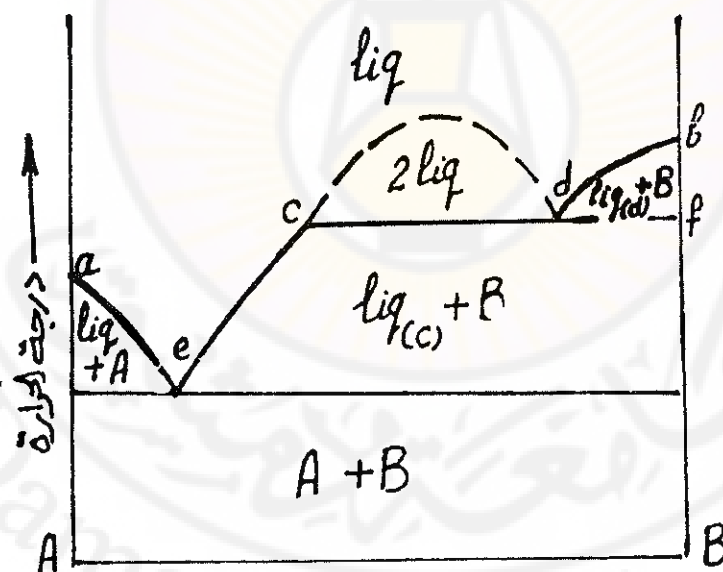
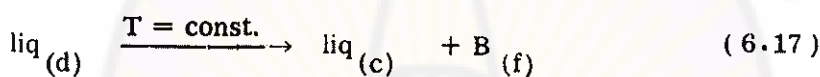
وبلورات العنصر B . وعند التبريد فإن التفاعل يكون عكسياً على الشكل التالي:



وهذا التفاعل يشبه التفاعل اليوتكتيكي الذي رأيناه سابقاً إلا أن السائل هنا يتفاعل مع البلورات الصلبة التي انفصلت منه مسبقاً معطياً مركباً كيميائياً وليس محلولاً معدنياً صلباً . ولفهم طبيعة هذا النوع من المخططات نقوم فيسايي بدراسة مراحل تبريد عينة منه ونبيّن ماهي التحولات والانفصالات التي تطرأ على هذه العينة من الحالة السائلة وحتى درجة الحرارة العادية .

العينة 1 : يبدأ تبلور السائل في النقطة 1 بتشكّل بلورات من العنصر B النقية وعندها يتغير تركيز السائل وفق المنحني (1 - d) . وفي النقطة 2 وعند درجة حرارة ثابتة يتشكل المركب الكيميائي غير المستقر وذلك وفق المعادلة (6.16) . وباتّهاء التفاعل اليوتكتيكي المؤدي لتشكّل المركب تبقى كمية من السائل زائدة عن التفاعل . وباستمرار التبريد للعينة يستمر تبلور هذه الكمية من السائل معطية بلورات من المركب الكيميائي $A_m B_n$ ، وهكذا حتى يصبح تركيز السائل مطابقاً لتركيز النقطة اليوتكتيكية e ، عندها يتفاعل السائل المتبقي بعد عملية التبلور هذه تفاعلاً يوتكتيكياً عند درجة حرارة ثابتة معطياً بلورات من العنصر A وبلورات من المركب الكيميائي $A_m B_n$ على شكل مزيج يوتكتيكي . وهكذا نلاحظ وجود عتبتين أفقيتين على منحني التبريد : الأولى تظهر حدوث التفاعل اليوتكتيكي عند درجة حرارة ثابتة وتشكّل المركب الكيميائي غير المستقر واختفاء بلورات العنصر B ، والثانية تظهر حدوث التفاعل اليوتكتيكي عند درجة حرارة ثابتة أيضاً وتشكّل المزيج اليوتكتيكي المؤلف من بلورات العنصر A وبلورات المركب الكيميائي $A_m B_n$.

VII - مخطط التوازن لخليطة مؤلفة من عنصرين لا يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة وعديسي الذوبان ببعضهما في الحالة الصلبة (ويسمى عادةً مخطط التوازن من النوع المونوتكتيكي للخلائط التي يكون الذوبان فيها محدوداً في الحالة السائلة) . في هذا النوع من المخططات ومن أجل نسب معينة من كلا العنصرين نلاحظ أن الطور السائل لا يلبث أن ينقسم إلى طورين سائلين - أي إلى محلولين سائلين غير متمازجين مع بعضهما . وعند بدء التبلور يصبح تركيز أحدهما مطابقاً لتركيز النقطة c وتركيز الآخر مطابقاً لتركيز النقطة d . ويدخل هذا الأخير في تفاعل يدعى التفاعل المونوتكتيكي تكون نتيجته بلورات من العنصر B ومحلول سائل تركيزه في النقطة e . وذلك وفق المعادلة التالية:



الشكل (٦ - ١٨) : مخطط توازن من النوع المونوتكتيكي للخلائط التي يكون الذوبان فيها محدوداً في الحالة السائلة .

ويتم هذا التفاعل في النقطة d عند درجة حرارة ثابتة .

إن انفصال المحالولين السائلين عن بعضهما بعضاً يتم على الخط المنحني المتقطع بين النقطتين c و d (انظر الشكل ٦ - ١٨) . أما باقي المنحنيات والخطوط فلا تختلف عن مثيلاتها فيما سبق ، من المخططات ، فالخط db يعني بدء التبلور من المحلول السائل (أي تشكل بلورات أولية من العنصر B) ، ويستمر هذا التبلور حتى الخط ed حيث يصبح تركيز السائل مطابقاً لتركيز النقطة d (وهو السائل الذي يدخل في التفاعل المونوتكتيكي وفق العلاقة السابقة) . والخط ec فيعني بدء تبلور بلورات العنصر B من السائل الذي تركيزه في النقطة c . أما الخط ae فيعني بدء ظهور بلورات العنصر A من المحلول السائل . والخط الأفقي المار من النقطة اليوتكتيكية هو خط التجمد وعندئذ يتم التفاعل اليوتكتيكي معطياً بلورات ثانوية لكلا العنصرين A و B .

٦ - ٦ - مخططات التوازن للخلائط التي تتمتع بمكوناتها بتغيرات آلوتروبية :

يسبقاً سابقاً (انظر البند ٤ - ٥ من الفصل الرابع) أن بعض المعادن (مثل الحديد) تتغير تغيراً آلوتروبياً في الحالة الصلبة - أي أن شكل الهياكل الشبكية يتغير في بلوراتها من شكل إلى آخر وعند درجة حرارة ثابتة ، ويرافق هذا التغير ثبات في درجة الحرارة منذ بدء التغير وحتى انتهائه . وبما أن هذا التغير يعد تغيراً طورياً - أي تغيراً من طور صلب إلى طور صلب آخر لذلك يجب علينا إظهاره في مخططات التوازن للخلائط الثنائية وبالشكل نفسه الذي أظهرنا فيه التغيرات الطورية الأخرى كالتغير من طور سائل إلى طور صلب وبعبارة أخرى فإن النقطة التي يبدأ عندها التغير الآلوتروبي تشبه النقطة التي يبدأ عندها التبلور والنقطة التي ينتهي عندها التغير الآلوتروبي تشبه النقطة التي ينتهي عندها التجمد .

إذا كان أحد عنصري الخليطة الثنائية هو أحد تلك المعادن التي تتغير تغيراً آلوتروبياً فإن لهذا التغير تأثيره في جزء من مخطط التوازن أو في مخطط التوازن بكامله وذلك حسب نوع المخطط الذي تشكله الخليطة • وقبل أن نرى التغيرات الآلوتروبية في مختلف مخططات التوازن يجب أن نعلم أن التغير الآلوتروبي هذا لا يحدث غالباً في الخلائط إلا في حالتين :

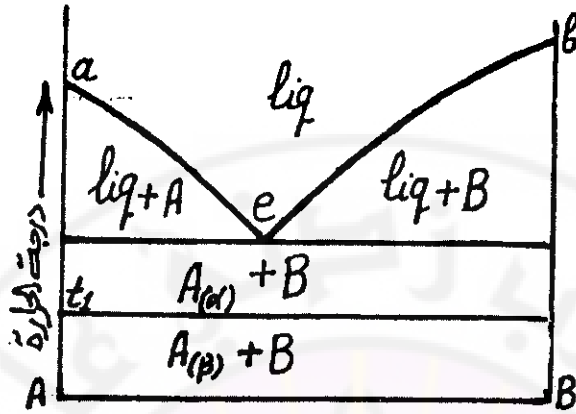
٢ - إذا كان المعدن القابل للتغير موجوداً في الخليطة على شكل بلورات نقية منفصلة •

ب - إذا كان هذا المعدن موجوداً في الخليطة بشكل محلول صلب يقوم فيه بدور المذيب •

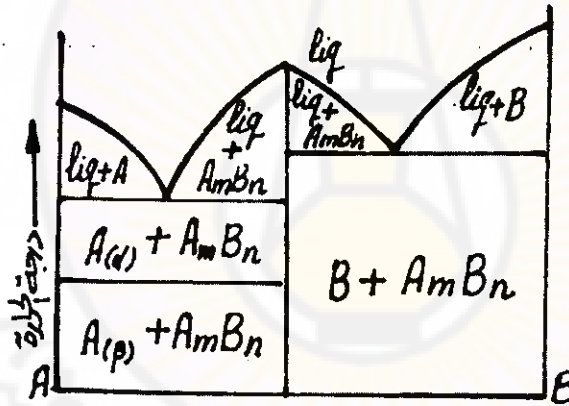
ولدراسة هذه التغيرات في مختلف أنواع مخططات التوازن يكفي أن ندرسها في الأنواع الخمسة التالية نظراً للتشابه بينها وبين الأنواع الأخرى التي سوف لن نتعرض لها •

١ - إذا كان مخطط توازن الخليطة من النوع الذي يتشكل فيه مزيج ميكانيكي من بلورات نقية لكلا العنصرين (أي مخطط من النوع اليوتكتيكي العادي - انظر الشكل ٦ - ١٩) • وأحد المعدنين وليكن A يتغير آلوتروبياً في الدرجة t_1 فإن درجة حرارة التغير هذه لا تختلف مهما اختلفت نسبة الخليطة وذلك لأننا وكما نعلم أن المنطقة الواقعة تحت خط التجرد الأفقي هي منطقة عدم تجانس أي أن كلا المعدنين موجود فيها بشكله الصافي لذلك فإن درجة الحرارة التي يتغير عندها A تبقى ثابتة ويظهر ذلك على مخطط التوازن على شكل خط أفقي يمتد حتى نهاية المخطط •

٢ - إذا كان مخطط التوازن من النوع الذي يتشكل فيه مركب كيميائي مستقر وغير قابل للذوبان في أي من عنصري الخليطة أو لإذابة أي منهما وأحد



الشكل (٦ - ١٩) : مخطط التوازن لخليطة تشكل مزيج ميكانيكي والعنصر A يتغير ألوتروبيا عند (t_1) .



الشكل (٦ - ٢٠) : مخطط التوازن الذي يحتوي على مركب كيميائي مستقر والعنصر A يتغير ألوتروبيا عند (t_1) .

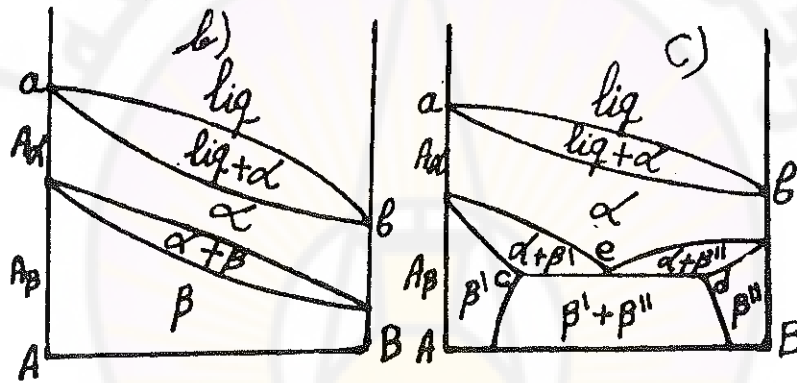
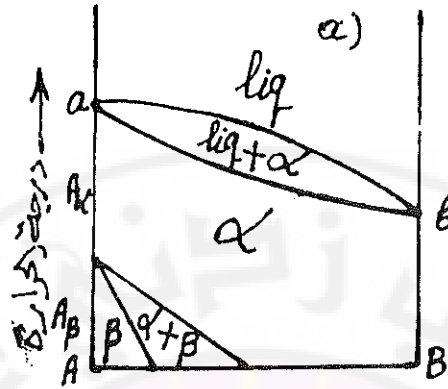
المعدنين أي أحد عنصري الخليطة (A) يتغير تغيراً ألوتروبيا في الدرجة t_1 فإن هذا التغير يتم في درجة حرارة ثابتة وعلى خط أفقي يمتد من النقطة t_1 حتى الخط الشاقولي المشير للتركيز الذي يتم عنده تشكل المركب الكيميائي للسبب نفسه الذي ذكرناه في الحالة السابقة ، أما في الجزء الواقع على يمين المركب فليس

للتغير الآلوتروبي فيه من وجود وذلك لان المنطقة الصلبة في ذلك الجزء من المخطط هي منطقة عدم تجانس لكل من المركب والمعدن الثاني ولاوجود للمعدن الأول فيها على شكل بلورات نقية حرة (انظر الشكل ٦ - ٢٠) .

٣ - إذا كان مخطط توازن الخليطة من النوع الذي يكون فيه الذوبان مطلقا في الحالتين السائلة والصلبة .

نحن نعلم من دراستنا السابقة أن المنطقة الواقعة تحت خط التجمد في هذا النوع من مخططات التوازن هي منطقة تجانس وتحتوي على طور واحد هو محلول صلب تكون فيه ذرات أحد المعدنين مذابة في الهياكل الشبكية للمعدن الآخر ، ونعلم أيضاً أن الذوبان المطلق في الحالة الصلبة يعني أن الهياكل الشبكية للمعدن الأول تشابه الهياكل الشبكية للمعدن الثاني . ولهذا يسكن أن نقول إن المعدن المتغير آلوتروبياً لم يعد يوجد هنا بشكله النقي وأن درجة الحرارة التي يحدث عندها التغير أصبحت غير ثابتة بل إنها قد تنخفض أو ترتفع كلما زادت نسبة المعدن الثاني في المحلول الصلب ، كما أن التغير نفسه لم يعد يتم في درجة حرارة ثابتة بل في مجال حراري معين . وعلى هذا الأساس تتنوع مخططات التوازن في هذه الحالة وذلك تبعاً لنوع العناصر المشكلة للخليطة وبمعنى آخر هل يحدث التغير الآلوتروبي في أحد العنصرين أو في كليهما وهل تشابه الهياكل الشبكية للعنصرين بعد التغير الآلوتروبي وهل يبقى الذوبان مطلقاً في الحالة الصلبة وحتى درجة الحرارة العادية . لهذا فهناك ثلاثة أنواع من مخططات التوازن تدرس كل حالة من الحالات التي ذكرناها على حدة وهي :

أ - المخطط الأول (انظر الشكل ٦ - ٢١ a) : ويبين أن التغير الآلوتروبي يحدث للمعدن A فقط وفي هذه الحالة تكون الهياكل الشبكية للمعدن B مشابهة لهياكل الشبكية للمعدن A قبل حدوث التغير الآلوتروبي فيه (أي أن هياكل B تشابه هياكل A) .



الشكل (٦ - ٢١) : مخططات التوازن للخلائط التي يكون الذوبان فيها غير محدود في الحالة الصلبة واحد المعدنين أو كلاهما يتغير تغيراً آلوتروبياً عند درجات حرارة معينة .

ب - المخطط الثاني (انظر الشكل ٦ - ٢١ ب) : ويثبت أن التغير آلوتروبي يحدث في كلا المعدنين .

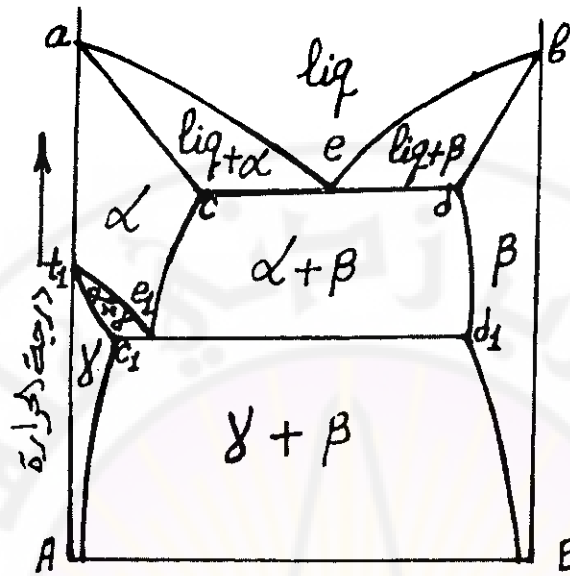
وفي هذه الحالة تكون الهياكل الشبكية لكل من $A_{(\alpha)}$ و $B_{(\alpha)}$ متشابهة ولكل من $A_{(\beta)}$ و $B_{(\beta)}$ متشابهة أيضاً وجميعها تشكل محاليل صلبة يكون الذوبان فيها مطلقاً .

ح - المخطط الثالث (انظر الشكل ٦ - ٢١ c) : ويبين أن التغير الأوتروبي يحدث في كلا المعدنين أيضاً ، إلا أن الذوبان هنا في الحالة الصلبة يكون مطلقاً في درجات الحرارة المرتفعة (أي قبل حدوث التغير الأوتروبي) ولكنه يتحول إلى ذوبان محدود بانخفاض درجة الحرارة وتشكل محاليل صلبة تكون نسبة الذوبان فيها محدودة . وهكذا نلاحظ أنه من المحلول الصلب « وباستمرار التبريد ينفصل أحد المحلولين الصلبين (β' أو β'') ، ويستمر هذا الانفصال حتى الخط ced حيث يتحول الطور الصلب « إلى طورين صلبين هما β' و β'' وعند درجة حرارة ثابتة وذلك وفق التفاعل التالي :

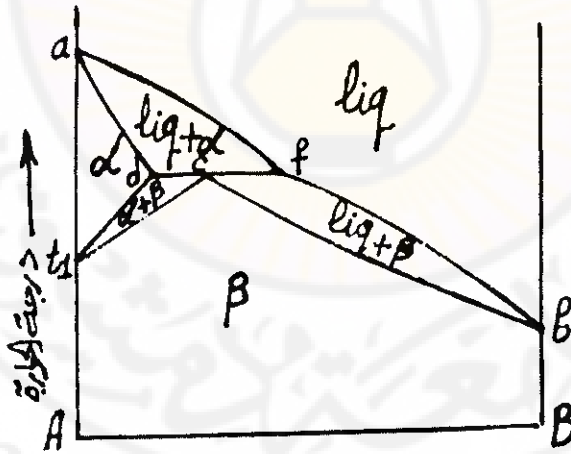


ويُسمى هذا التحول للطور الصلب عند درجة حرارة ثابتة التفاعل اليوتكتويدي وتشكل بنتيجته مزيج ميكانيكي مؤلف من طورين متجانسين على غرار التفاعل اليوتكتيكي .

٤ - إذا كان مخطط التوازن من النوع اليوتكتيكي وكان الذوبان محدوداً في الحالة الصلبة والمعدن A (مثلاً) يتغير تغيراً أوتروبياً عند الدرجة t_1 فإن مخطط التوازن يصبح من النوع الموجود على الشكل (٦ - ٢٢) . وكما نلاحظ من الشكل أن التغير الأوتروبي يتم في المحلول الصلب الذي قاعدته المعدن A (أي المحلول «) بالشكل نفسه الذي تم في الأمثلة السابقة . وكما نلاحظ أيضاً أن النقطة e_1 تعني نقطة التقاء ثلاثة أطوار هي : « و β و γ وكما نعلم من دراستنا السابقة أن وجود ثلاثة أطوار في حالة التوازن في خليطة ثنائية يعني ثباتاً في درجة الحرارة ريثما يختفي أحد هذه الأطوار وهو ما أطلقنا عليه في مثالنا السابق التفاعل اليوتكتويدي .



الشكل (٢٢ - ٦) : مخطط توازن من النوع اليوتكتيكي والدوبان محدود في الحالة الصلبة والمعدن A يتغير ألفا أوتروبياً عند الدرجة t_1



الشكل (٢٣ - ٦) : مخطط توازن من النوع البيركتيكي والدوبان محدود في الحالة الصلبة والمعدن A يتغير أوتروبياً عند الدرجة t_1

هـ - إذا كان مخطط التوازن من النوع البيرتكتيكي وكان الذوبان محدودا في الحالة الصلبة والمعدن A (مثلاً) يتغير تغيراً آلوتروپيا عند الدرجة t_1 فإن مخطط التوازن يصبح من النوع الموجود على الشكل (٦ - ٢٣) . ومن الشكل نلاحظ أن الهياكل الشبكية للمعدن A بعد التغير الآلوتروبي تشبه هياكل B بدون تغير آلوتروبي ، وهذا يعني أن المعدن A بعد تغيره الآلوتروبي سوف يشكل مع المعدن B محاليل صلبة يكون الذوبان فيها مطلقاً في الحالة الصلبة .

* * *

الفصل السابع

أهم الخواص الفيزيائية للمعادن والخلائط المعدنية

٧ - ١ - الوزن النوعي للمعادن والخلائط المعدنية :

يعرف الوزن النوعي على أنه وزن واحدة الحجم من المادة ، أما الحجم النوعي فهو حجم واحدة الأوزان . ومن المعروف أن وحدة قياس الوزن النوعي هي إما الغرام/سم^٣ أو الكغ/دم^٣ ، وتتفق هاتان الوحدتان من حيث القيمة الرقمية . وتتراوح الأوزان النوعية للمعادن ما بين ١٧ غ/سم^٣ (وهو الوزن النوعي للمغنزيوم) و ١٩٣ غ/سم^٣ (للذهب) .

وبما أن المعادن ذات بنية بلورية في الحالة الصلبة فإنه من الممكن حساب الوزن النوعي لمعدن ما بعد معرفة كل من مقاييس الهيكل الشبكي وعدد الذرات التابعة له والوزن الذري لهذا المعدن وذلك وفق العلاقة التالية :

$$\gamma = \frac{nA}{N \cdot V} \quad (7.1)$$

حيث : n - عدد ذرات الهيكل الشبكي الواحد .

A - الوزن الذري للمعدن .

V - حجم الهيكل الشبكي .

N - رقم لوشبيث الذي يساوي 6.025×10^{23} ذرة .

فمن هذه العلاقة يمكننا مثلاً حساب الوزن النوعي لكل من معدني الحديد والنحاس :

$$\gamma_{Fe} = \frac{2.55,84}{6,025 \cdot 10^{23} \times (2,86 \cdot 10^{-8})^3} = 7,86 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_{Cu} = \frac{4.63,54}{6,025 \cdot 10^{23} \times (3,61 \cdot 10^{-8})^3} = 8,95 \text{ g/cm}^3$$

أما عند خلط معدنين أو أكثر فانه نادراً ما يحدث تغير في الحجم أي أن حجم الخليطة هو مجموع حجوم العناصر الداخلة في تكوينها وبما أن وزن الخليطة أيضاً هو مجموع أوزان مكوناتها فالوزن النوعي للخليطة يتناسب مع نسبة تركيزها الحجمي كما أن حجمها النوعي يتناسب مع نسبة تركيزها الوزني . فالجسم النوعي للخليطة الثنائية هو :

$$V_{al.} = X_w \cdot V_A + (1 - X_w) \cdot V_B \quad (7.2)$$

أما الوزن النوعي لهذه الخليطة فهو :

$$\gamma_{al.} = \frac{1}{\frac{X_w}{\gamma_A} + \frac{1 - X_w}{\gamma_B}} = X_V \gamma_A + (1 - X_w) \gamma_B \quad (7.3)$$

حيث : γ_A ، γ_B - الأوزان النوعية للمعدنين A و B .

V_A ، V_B - الحجوم النوعية للمعدنين A و B .

X_w - النسبة الوزنية و X_V - النسبة الحجمية للمعدن A .

$(1 - X_w)$ النسبة الوزنية و $(1 - X_V)$ النسبة الحجمية للمعدن B .

ومن العلاقتين السابقتين (7.2) و (7.3) يمكننا أن نستنتج النسبة الحجمية لكل من عنصري الخليطة :

$$X_V = \frac{X_w}{X_w + (1 - X_w) \frac{\gamma_A}{\gamma_B}} \quad (7.4)$$

$$(1 - X_V) = \frac{(1 - X_w) \frac{\gamma_A}{\gamma_B}}{X_w + (1 - X_w) \frac{\gamma_A}{\gamma_B}} \quad (7.5)$$

من هنا نجد أن العلاقة طردية بين الحجم النوعي للخليطة ونسبة تركيزها الوزنية . وتعد هذه العلاقة الطردية قائمة في حالة الخلائط غير المتجانسة والخلائط ذات المحاليل الصلبة غير أنها لا تصلح للاستعمال في حالة الخلائط ذات المركبات حيث أن المركب الذي ينتج عن اتحاد الخليطة أو عناصرها قد يكون ذا حجم نوعي أكبر أو أصغر من مجموع نسب الحجم النوعية لعناصر الخليطة المحسوبة حسب قاعدة المزج (سوف نتحدث عن هذه القاعدة فيما بعد) .

٧-٢ - الخواص الحرارية للمعادن والخلائط المعدنية :

تتنوع الخواص الحرارية للمعادن والخلائط المعدنية ، ولكن أهم هذه الخواص هي : الحرارة النوعية - الحرارة النوعية الذرية - حرارة الانصهار - حرارة التغير للألوتروبي - اختزان الحرارة - التمدد الحراري . وسوف نتعرف فيما يلي على تعريف كل من هذه الخواص وأهم ما يميزها .

٧-٢-١ - الحرارة النوعية : تُعرف الحرارة النوعية على أنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحدة الكتلة من المادة درجة مئوية واحدة ، ولهذا تكون

وحدة قياس الحرارة النوعية هي $\left[\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ أو $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ ويرمز لها بالرمز c_p (أي الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت) • وتسمى الحرارة النوعية في بعض الاحيان الحرارة النوعية الكتلية وذلك لتمييزها عن الحرارة النوعية الحجمية والتي هي $(c_p \times \gamma)$ حيث γ - الوزن النوعي • وعندها تكون وحدة قياس الحرارة النوعية الحجمية هي $\left[\frac{\text{cal}}{\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ أو $\left[\frac{\text{J}}{\text{dm}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ وتُعرف على أنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحدة الحجم من المادة درجة مئوية واحدة •

إن أهم ما يميز الحرار النوعية هو علاقتها بدرجة الحرارة ، تلك العلاقة التي تحددها المعادلة التجريبية التالية :

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^{-1/2} + eT^3 \quad (7.6)$$

حيث : a, b, c, d, e - قيم ثابتة لكل معدن على حدة •
 T - درجة الحرارة مقيسة بالـ $^\circ\text{K}$ (الكلفين) أي المئوية بدءاً من الصفر المطلق •

أما الحرارة النوعية لخليطة معدنية في الحالة الصلبة فتحددها قاعدة نيومان وكوب والتي تقول إن الحرارة النوعية لخليطة ما تساوي مجموع قيم الحرارة النوعية للعناصر المكونة للخليطة كلاً حسب نسبته ، أي أنه يمكن حساب الحرارة النوعية للخليطة من قاعدة المزج نفسها ، فإذا كان لدينا خليطة ثنائية مكونة من معدن A بنسبة X ومن معدن B بنسبة $(1 - X)$ فإن الحرارة النوعية لهذه الخليطة حسب القاعدة المذكورة تساوي :

$$C_{al.} = X c_A + (1 - X) c_B \quad (7.7)$$

حيث : c_A و c_B - الحرارة النوعية لكل من المعدن A والمعدن B بالترتيب .

وتعد قاعدة المزج آتفة الذكر صالحة حتماً في الخلائط غير المتجانسة والتي تحتوي على كل من عناصر الخليطة بشكل مستقل كما أنها تصلح في كثير من الخلائط ذات المحاليل الصلبة المتجانسة أو ذات المركبات . وقد ثبت تجريبياً وعن طريق القياسات أن الحرارة النوعية المقاسة في بعض الخلائط ذات المحاليل الصلبة مثل : $Ag - Au$ و $Fe - Ni$ وبعض الخلائط ذات المركبات مثل $Al - Cu$ و $Al - Mg$ و $Mg - Si$ وغيرها لا تختلف بأكثر من ٣٪ عن تلك المحسوبة باستعمال القاعدة السابقة . غير أن هذا الاختلاف يصبح أكبر من ذلك بكثير في بعض الخلائط مثل خليطة النحاس والتوتياء ، مما يجعل استعمال القاعدة السابقة في حساب الحرارة النوعية غير مجدٍ .

٧-٢-٢ - الحرارة النوعية الذرية : غالباً ما تستعمل في الحسابات النظرية الحرارة النوعية الذرية وهي الحرارة النوعية للوزن الذري الغرامي حين $C_p = A \cdot c_p$. وينطبق على الحرارة النوعية الذرية كل ما قيل في البند السابق ابتداءً من العلاقة بدرجة الحرارة وانتهاءً بإمكان تطبيق قاعدة المزج في حساب الحرارة النوعية للخلائط المعدنية أو عدم إمكان تطبيق هذه القاعدة . لهذا تبقى المعادلة آتفة الذكر سارية المفعول في هذه الحالة أيضاً .

٧-٢-٣ - حرارة الانصهار : نحن نعلم أن حرارة الانصهار هي كمية الحرارة اللازمة لاكساب الذرات قدرة حركية تصبح بها قادرة على التغلب على قوى الارتباط في الهياكل الشبكية . لهذا تتعلق كمية الحرارة هذه بنوع المعدن (أي بمقدار قوى الارتباط الموجودة بين ذراته) . وبما أن كمية حرارة المعدن تزداد عند انصهاره في الوقت الذي تكون فيه درجة حرارته ثابتة فإن الحرارة

النوعية تفقد معناها الفيزيائي ، لذا تحدد كمية حرارة الانصهار بما يُسمى الاتتاليا النوعية h_m ووحدة قياسها $[\frac{J}{kg} , \frac{cal}{g}]$. وغالباً ما تحدد حرارة الانصهار هذه (أو الاتتاليا النوعية) بشكل تقريبي بالمعادلة التالية :

$$h_m \simeq 2 T \quad (7.8)$$

حيث : T - درجة حرارة الانصهار بدءاً من الصفر المطلق .

٧-٢-٤ - حرارة التغير الآلوتروبي : تعرف حرارة التغير الآلوتروبي على أنها كمية الحرارة التي تكتسبها ذرات المعدن عند درجة حرارة ثابتة وذلك كي تعيد بناء هياكلها الشبكية والمعدن لا يزال في حالته الصلبة . وكمية الحرارة هذه مقدار ثابت أيضاً ويتعلق بنوع المعدن وتدعى بالاتتاليا النوعية للتغير الآلوتروبي h_v ولها وحدات قياس مئيلتها نفسها للانصهار .

٧-٢-٥ - اختزان الحرارة : إن ازدياد درجة حرارة كتلة مقدارها غرام واحد من المعدن بمقدار ΔT عند ادخال كمية من الحرارة مقدارها ΔQ يتحدد بصفة عامة من المعادلة التالية :

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c_p} \quad (7.9)$$

حيث : ΔQ - مقدار الحرارة المختزنة .

c_p - الحرارة النوعية للمعدن والتي تتعلق بدرجة الحرارة (المعادلة

٧.٦) .

فاذا فرضنا أن درجة الحرارة تغيرت من T_1 إلى T_2 فإن كمية الحرارة

التي تختزنها واحدة الكتل من المعدن تحدد بالتكامل التالي :

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = \left[aT + \frac{b}{2}T^2 + \frac{c}{3}T^3 + 2dT^{\frac{1}{2}} - eT^{-1} \right]_{T_1}^{T_2} \quad (7.10)$$

وتبقى المعادلة (7.10) في حساب الحرارة المختزنة سارية المفعول حتى لحظة حدوث تغيرات طورية أو ألتروية عندها (وكما بيئنا آنفاً) تزداد كمية الحرارة المختزنة بمقدار ثابت دون أن تتغير درجة الحرارة • وليان ذلك نأخذ كمثال كمية الحرارة التي يسكن أن تختزنها كتلة مقدارها غرام واحد من الحديد النقي عند تسخينها من درجة حرارة الصفر وحتى درجة حرارة الانصهار :

$$Q = \int_0^{768} c_1 dT + Q_{768} + \int_{768}^{911} c_2 dT + Q_{911} +$$

$$\int_{911}^{1392} c_3 dT + Q_{1392} + \int_{1392}^{1539} c_4 dT + Q_{1539} \quad (7.11)$$

حيث : c_1, c_2, c_3 و c_4 - القيم الوسطية للحرارة النوعية في مجالات الحرارة التي أخذت ضمنها •

Q_{768} - كمية الحرارة المختزنة عند نقطة كيوري (أي عندما يفقد الحديد خواصه المغناطيسية) •

Q_{911} و Q_{1392} - كميات الحرارة المختزنة عند حدوث التغيرات الألتروية •

Q_{1539} - كمية حرارة الانصهار •

٧-٢-٦ - التمدد الحراري : يزداد الحجم النوعي للمعادن والخلائط المعدنية بارتفاع درجة حرارتها - أي أن مقياس القطعة المعدنية تزداد بارتفاع درجة الحرارة • وعندما يكون أحد الأبعاد الثلاثة للقطعة أكبر بكثير من البعدين الآخرين كما هي

الحال في القضبان والاشرطة والاسلاك فائنا نأخذ تمددها حسب البعد الأكبر بعين الاعتبار أي تمددها الطولي ونسمي هذا التمدد التمدد الحراري الخطي (أو الطولي) للقطعة. فإذا ارتفعت درجة حرارة القطعة من الصفر إلى درجة الحرارة t فإن طولها في هذه الدرجة يصبح مساوياً :

$$l_t = l_0 (1 + \beta t) \quad (7.12)$$

حيث :

l_0 - طول القطعة في درجة الصفر المئوي .
 β - عامل التمدد الطولي للمعدن وهو التمدد الحاصل في وحدة الطول للمعدن عند ارتفاع درجة الحرارة بمقدار درجة مئوية واحدة .

ويشبه التمدد الحجمي للمعدن بمعادلته التمدد الطولي حيث يمكن كتابة معادلة التمدد الحجمي :

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t) \quad (7.13)$$

حيث :

V_0 - الحجم في درجة الصفر المئوي .
 α - عامل التمدد الحجمي ويساوي ثلاثة أضعاف عامل التمدد الطولي
 $(\alpha = 3\beta)$.

... لا تصلح المعادلات (7.12) و (7.13) إلا ضمن مجالات حرارية صغيرة (٥٠ درجة مئوية تقريباً) ذلك لأن عامل التمدد نفسه يتغير بتغير درجة الحرارة . ويمكن التعبير عن هذا التغير بإحدى العلاقتين التاليتين :

$$\beta_t = \beta_0 + \alpha t \quad (7.14)$$

$$\beta_t = \beta_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (7.15)$$

حيث : β_0 - عامل التمدد الطولي في درجة الصفر المتوي •
 a و a_1 و a_2 - ثوابت تتعلق بنوع المعدن •

أما في الخلائط المعدنية فإن مقدار التمدد الحراري يمكن حسابه في أغلب الأحيان من عامل التمدد المحسوب من العلاقة البسيطة لقاعدة المزج - أي من عوامل تمدد عناصر الخليطة ونسب تلك العناصر في تركيب الخليطة وبخاصة الخلائط ذات البنية غير المتجانسة • إذ يحسب عامل تمدد الخليطة من العلاقة التالية :

$$\beta_{al.} = \beta_A X + \beta_B (1 - X) \quad (7.16)$$

وأما في الخلائط ذات البنية المتجانسة وبخاصة المحاليل الصلبة منها فإنه يمكن حساب عامل تمددها أيضاً بالعلاقة السابقة نفسها ذلك لأن الفرق بين عامل التمدد الحقيقي وعامل التمدد المحسوب بهذه العلاقة نادراً ما يتجاوز الـ ٥٪ ، أما الخلائط التي تحتوي على مركبات كيميائية أو معدنية فإن عامل تمددها يختلف كل الاختلاف عما يمكن حسابه وفق نسب التركيز • وفي خلائط الحديد والفحم (ولأن هذه الخلائط ذات بنية غير متجانسة) فإن عامل التمدد يختلف باختلاف نسبة الفحم ويمكن حسابه من العلاقة التالية :

$$\beta = (12,7 - 1,75 \cdot C\%) \cdot 10^{-6} \quad (7.17)$$

وتجدر الإشارة هنا إلى نقطتين هامتين هما :

١ - إن التغيرات التي تطرأ على البنية من انفصال صلب وتفاعل يوتكتويدي وتغير آوتروبي كلها تؤثر في عامل التمدد بشكل مباشر ومفاجئ • فالانفصال الصلب

يعني ظهور طور جديد في البنية ، ويبدأ هذا الطور بظهور بلورات صغيرة تبدأ بالنمو بين البلورات التي كانت موجودة سابقاً مما يسبب تغيراً في الحجم من جهة وتغيراً في مقدار الاجهادات الداخلية للقطعة من جهة أخرى ، ونتيجة هذه العوامل قد تظهر على شكل تمدد أو تقلص أو قد لا تؤثر في حجم الخليطة .

٢ - يزداد حجم المعدن بصفة عامة عند تحوله من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة ماعدا ثلاثة معادن ينقص حجمها عند درجة حرارة الانصهار وهي: الغاليوم والبيزموت والانتيموان .

٧ - ٣ - ناقلية الكهرباء والحرارة عند المعادن والخلائط المعدنية :

نحن نعلم أن الالكترونات التي تقوم بنقل القدرة الكهربائية في النواقل المعدنية هي نفسها التي تقوم بنقل القدرة الحرارية ، لهذا فان هناك علاقة وثيقة بين ناقلية المعدن (أو الخليطة المعدنية) للتيار الكهربائي وناقليتها للحرارة . وعلى هذا الاساس فان الامور كافة التي تؤثر في ناقلية ناقل ما للتيار الكهربائي (مثل إضافة عنصر سبائكي أو التشكيل ... الخ) تؤثر أيضا في ناقليته للحرارة بالشكل نفسه وبالمقدار نفسه .

٧ - ٢ - ١ - ناقلية المعادن النقية للتيار الكهربائي :

من المعروف أن ناقلية التيار الكهربائي تزداد بازدياد مقطع الناقل F وتقصان طوله L ، كما أن هذه الناقلية تتعلق بنوعية الناقل نفسه أو طبيعته أو بالأحرى بالناقلية النوعية للمادة المصنوع منها هذا الناقل أي أن :

$$R = \rho \frac{L}{F} = \frac{1}{K} \cdot \frac{L}{F} \quad (7.18)$$

حيث : " - المقاومة النوعية للمادة • K - الناقلية النوعية لتلك المادة.

والمقاومة النوعية هي مقاومة قطعة من المادة على شكل مكعب طول حرفه

١ سم وتقدر هذه المقاومة بالأوم • وبما أن المقاومة النوعية لأكثر المعادن الهامة هي

من مرتبة 10^{-6} أوماً لذلك كثيراً ما تستعمل وحدة الميكروأوم سم حيث الميكروأوم =

10^{-6} أوما •

أما في الحياة العملية فتستعمل بدلاً من المقاومة النوعية السابقة مقاومة شريط

من المادة المعنية مقطعه ١ مم^٢ وطوله متر واحد مقدرة بالأوم وبهذا فإن المقاومة

النوعية العملية هذه تساوي 10^{-4} من المقاومة النوعية السابقة • والمقاومة النوعية

للمعادن تعطى غالباً بجداول تحتوي على مقاومة ١ سم^٢ من المعدن أي المقاومة

النوعية الأولى •

إن ناقلية التيار الكهربائي أو بالأحرى المقاومة النوعية هي إحدى الخواص

الشعاعية للبلورات المعدنية وكونها خاصة شعاعية فهذا يعني أنها تختلف في البلورة

الواحدة من اتجاه الى اتجاه آخر - أي أن المقاومة النوعية المقيسة في البلورة

الواحدة باتجاه المحور الرئيس لهذه البلورة مثلاً تختلف عن تلك المقيسة بالاتجاه

المعكبي على هذا المحور (طبعاً ما عدا البلورات ذات الهياكل الشبكية المكعبة)،

لهذا فإن القطع المعدنية المشكلة على البارد وبخاصة ذات الهياكل الشبكية السداسية

أو الرباعية تختلف مقاومتها للتيار من اتجاه الى آخر على عكس القطع المسكوبة

والتي تكون بلوراتها غالباً غير منتظمة الاتجاه وعندئذ تكون المقاومة النوعية

متساوية بالاتجاهات كافة وذلك لأنها تمثل وسطي المقاومة النوعية لعدد من

البلورات ذات الاتجاهات المختلفة •

٧ - ٢ - ٢ - تأثير الحرارة في ناقلية المعادن للتيار الكهربائي :

إن المقاومة النوعية التي تعطىها الجداول هي عادةً المقاومة النوعية في درجة الحرارة العادية • غير أن النواقل المعدنية تزداد مقاومتها هذه بارتفاع درجة الحرارة • ومقدار ازدياد المقاومة النوعية بارتفاع درجة الحرارة درجة مئوية واحدة يسمى العامل الحراري للمقاومة النوعية ويحسب عادةً من ازدياد مقاومة الناقل عند ارتفاع درجة حرارته من الصفر وحتى ١٠٠° مئوية من العلاقة التالية :

$$a = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_{100} - R_0}{100 - 0} \quad (7.19)$$

غير أنه بارتفاع درجة الحرارة تتغير مقاييس الناقل نفسه وأبعاده نتيجة للتمدد الحراري ، فإذا أهملنا هذا التسدد فإنه يمكن أن نكتب العلاقة على الشكل التالي:

$$a = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_{100} - \rho_0}{100} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta t} \quad (7.20)$$

وعندها تكون المقاومة النوعية في درجة حرارة ما هي :

$$\rho_t = \rho_0 (1 + a t) \quad (7.21)$$

ومقاومة الناقل الكلية هي :

$$R_t = R_0 (1 + a t) \quad (7.22)$$

غير أن العامل الحراري هذا هو نفسه يتغير بتغير درجة الحرارة • لذلك فإن العلاقة السابقة لا تصلح إلا في المجالات الحرارية الصغيرة - أي على الأكثر ضمن ١٠٠° مئوية ولحساب المقاومة في درجة حرارة مرتفعة بشكل أدق يجب استعمال العلاقة التالية :

$$R_t = R_0 (1 + a_1 t + a_2 t^2) \quad (7.23)$$

إن المعادن الفرومغناطيسية (مثل الحديد والنيكل والكوبالت) تتصرف تصرفاً خاصاً من حيث مقاومتها النوعية حيث أنه بارتفاع درجة الحرارة في بادئ الأمر تزداد مقاومتها النوعية بشكل عادي إلا أنها عندما تقترب من درجة التغير المغناطيسي فإن مقاومتها النوعية تزداد بشكل سريع وتصبح مقاومتها فوق تلك الدرجة أكبر من المقاومة التي يمكن حسابها من العلاقات السابقة • وعند درجة التحول المغناطيسي يحول منحني المقاومة النوعية اتجاهه أي أنه هذه النقطة هي نقطة انكسار في اتجاه المنحني •

أما التحول الآلوتروبي فإنه لا يؤثر في تغيير المقاومة النوعية – أي لا يشكل انكساراً في منحني هذه المقاومة بتابعة درجة الحرارة الأمر الذي يؤكد لنا أن المقاومة الكهربائية لا تتعلق بالشكل البلوري بل بالمدارات الإلكترونية للذرة والالكترونات الحرة للمعدن •

وعند انصهار المعدن تتغير ناقليته للتيار الكهربائي بشكل مفاجئ وبشكل يشبه تغير الحجم النوعي الذي يرافق الانصهار • وأكثر المعادن يزداد حجمها النوعي ومقاومتها الكهربائية ماعداً الغاليوم والبيزموث والأنتيمون فينقص كل من حجمها النوعي ومقاومتها • وازدياد المقاومة عند الانصهار بالنسبة لأكثر المعادن يعادل تقريباً ١٠٠٪ – أي أن مقاومتها تتضاعف عند تحولها من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة ، وباستمرار ارتفاع درجة الحرارة في الحالة السائلة هذه تستمر المقاومة الكهربائية بالازدياد إلا أن العامل الحراري في الحالة السائلة يختلف عنه في الحالة الصلبة •

٧ - ٢ - ٣ - تأثير التشكيل والتطرية في ناقلية المعادن للتيار الكهربائي :

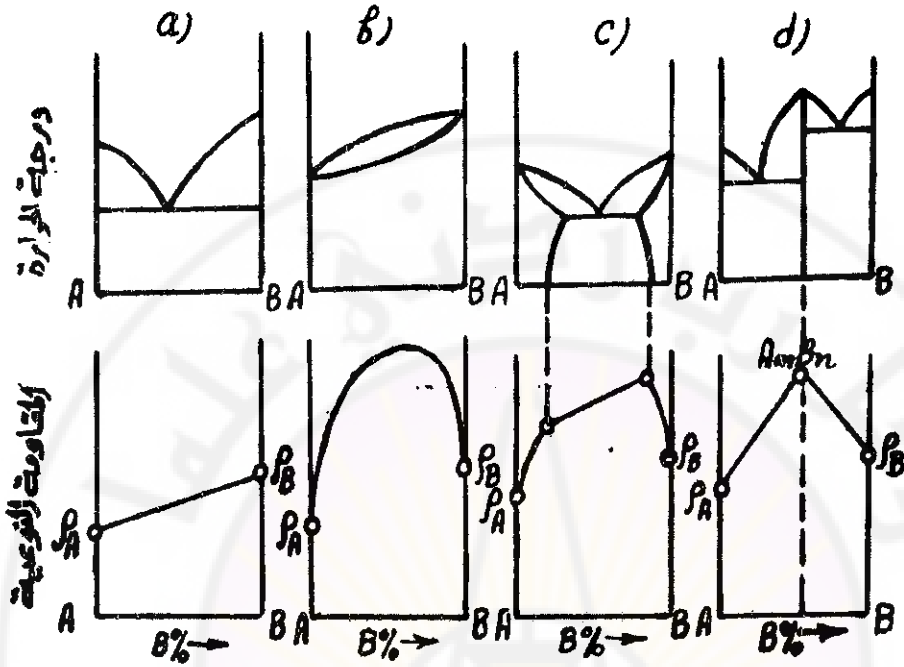
من المعروف أن التشكيل البارد يغير من الحجم النوعي للمعدن ، لهذا فإنه يؤثر في مقاومته النوعية أيضا ، وبنقصان الحجم النوعي تقل المقاومة النوعية - أي أن المقاومة النوعية لقطعة معدنية مسكوبة تقل بعد تشكيلها على البارد غير أنه إذا زادت نسبة التشكيل عن ٧٠٪ فإن المقاومة النوعية تزداد قليلا .

أما بالنسبة للأسلاك المسحوبة على البارد فإن مقاومتها النوعية تنخفض من جديد عند تطريتها . والمقاومة النوعية هذه تصل الى حد أدنى عند شروط تطرية معينة - أي بالتطرية في درجة حرارة معينة ولفترة زمنية محددة . وشروط الحصول على مقاومة نوعية صغيرة تتفق مع شروط التطرية نفسها - أي أنه كلما ارتفعت درجة الحرارة احتجنا لفترة زمنية أقصر وبالعكس كلما انخفضت درجة الحرارة أصبح من الضروري زيادة فترة الإحماء . فمثلا تنخفض مقاومة سلك من النحاس مسحوب على البارد الى الحد الأدنى بإحمائه الى الدرجة ٢٥٠° مئوية لمدة ثلاث ساعات أو في الدرجة ٤٥٠° مئوية لمدة ثلاث دقائق .

وتتغير المقاومة النوعية لبعض المعادن ذات الهياكل الشبكية غير المكعبة عند السحب والتطرية بأشكال خاصة بها وذلك بسبب تشكل النسيج البلورية المختلفة، إلا أن هذه التغيرات ليست ذات قيمة عملية .

٧ - ٢ - ٤ - ناقلية الخلائط المعدنية للتيار الكهربائي :

نحن نعلم أن شكل مخطط التوازن يتعلق بنوعية الأطوار والمركبات التي يشكلها عنصرا الخليطة . وتتعلق خواص الخليطة الفيزيائية (بما فيها المقاومة النوعية الكهربائية) بنوعية الأطوار والمركبات التي يشكلها هذان المكونان . من هنا يتضح لنا وجود علاقة معينة بين المقاومة النوعية وشكل مخطط التوازن . ويبيّن الشكل



الشكل (٧ - ١) : تبين علاقة المقاومة النوعية للخليطة بتركيزها من مخطط توازن الى آخر .

(٧ - ١) كيف تتغير علاقة المقاومة النوعية للخليطة بتركيزها من مخطط إلى آخر .

١ - ففي الخلائط ذات البنية الصلبة غير المتجانسة - أي التي تحتوي على كل من المعدنين على شكل أطوار مستقلة (مزيج ميكانيكي) نلاحظ أن المقاومة النوعية للخليطة تتغير وفق خط مستقيم يصل بين مقاومتي المعدنين (انظر الشكل ٧ - ١ a) . وهذا يعني أن المقاومة النوعية لأي عينة من هذه المصنوعة يمكن حسابها باستعمال قاعدة المزج والتي أصبح شكلها مألوفاً :

$$\rho_{al.} = \rho_A x + \rho_B (1 - x) \quad (7.24.)$$

وبالطبع فإن القيمة التي نحصل عليها هي قيمة تقريبية لأن الخط الحاصل

ليس مستقيماً تماماً كما يبدو لنا من الشكل ، أما إذا أردنا حساب المقاومة النوعية بدقة فائنا نلجأ لقاعدة المزيغ اللوغاريتمية والتي أثبتت صحتها بالتجارب وهي من الشكل التالي :

$$\log \rho_{al.} = x \log \rho_A + (1 - x) \log \rho_B \quad (7.24)$$

٢ - أما في الخلائط التي يكون الذوبان فيها مطلقاً في الحالة الصلبة - أي التي تتشكل فيها محاليل صلبة فإن المقاومة النوعية تكون أكبر بكثير من المقاومة النوعية التي يمكن حسابها من مكونات المحلول الصلب وفق قاعدة المزيغ (انظر الشكل ١ - ٧ b) . فمن هذا الشكل نلاحظ أن المقاومة النوعية تتغير بتغير تركيز الخليطة على منحني ذي نهاية عظمى . من هنا نستنتج أن المقاومة النوعية تزداد بشكل كبير عند تشكل المحاليل الصلبة .

٣ - وفي الخلائط التي يكون الذوبان فيها محدوداً في الحالة الصلبة فإن المقاومة النوعية تتغير بتغير تركيز الخليطة على منحني فقط في المجال الذي يوافق تشكل محلول صلب أحادي الطور (انظر الشكل ١ - ٧ c) . أما في مجال تركيز الخليطة الذي يوافق تشكل مزيغ ميكانيكي لمحلولين صلبين فإن تغير المقاومة النوعية يكون وفق خط مستقيم .

٤ - وفي الخلائط التي يتشكل فيها مركب كيميائي من أجل نسبة تركيز محددة فائنا نلاحظ أن تركيز المركب الكيميائي يوافق نهاية عظمى (أو صغرى) على منحنى تغير المقاومة النوعية بتغير تركيز الخليطة (في حالتنا هذه نلاحظ أن النهاية العظمى هي انكسار مستقيم تغير المقاومة النوعية - انظر الشكل ١ - ٧ d) .

إن لارتفاع درجة حرارة الخليطة تأثيراً في مقاومتها النوعية يشبه تأثير الحرارة في المقاومة النوعية للمعادن النقية - أي أن المقاومة النوعية للخليطة تزداد

بارتفاع درجة حرارتها وحسب عامل ثابت يتعلق بنوع الخليطة وتركيزها • ويبقى منحنى المقاومة النوعية للمجموعة الخلائطية لمعدنين محافظا على شكله تقريبا بارتفاع درجة الحرارة إلا أنه ينزل قليلاً نحو الأعلى •

٧ - ٢ - ٥ .- ناقلية المعادن والخلائط المعدنية للحرارة :

إن كمية الحرارة التي تمر عبر قضيب معدني مساحة مقطعه F وخلال فترة من الزمن τ هي :

$$Q = \lambda \cdot F \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \tau \quad (7.25)$$

حيث :

- Q - كمية الحرارة ووحدة قياسها (cal أو J) .
- dT - مقدار الفرق في درجة الحرارة على طول جزءٍ من القضيب مقداره dx .
- λ - ثابت يتعلق بنوع المعدن ويسمى الناقلية الحرارية للمعدن ووحدة قياسها $\left[\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{sec.}} \text{ أو } \frac{\text{W}}{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$.

لقد ذكرنا آنفاً أن هناك علاقة وثيقة بين ناقلية المعدن للتيار الكهربائي وناقليته للحرارة ، لهذا فإن تصنيف المعادن من حيث ناقليتها للحرارة لا يختلف عن تصنيفها من حيث ناقليتها للتيار الكهربائي • ولقد وجد أن لكل معدن نسبة ثابتة تقريبا بين ناقليته للحرارة وناقليته للكهرباء أي أن : $\left(\frac{\lambda}{K} = \text{const} \right)$ • كما وجد أن هذه

النسبة لا تختلف من معدنٍ لآخر إلا بمقدار بسيط جداً يمكن إهماله حيث :

$$\frac{\lambda}{K} = (650 - 700) \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \Omega} \quad (7.26)$$

غير أن تغير ناقلية الحرارة بارتفاع درجة الحرارة أقل من تغير ناقلية الكهرباء

مما أوجب البحث عن علاقة أخرى بين هذين العاملين بحيث تأخذ تغير درجة الحرارة بعين الاعتبار وتكون أكثر صلاحية من العلاقة السابقة ، وتستعمل الآن النسبة التالية :

$$\frac{\lambda}{KT} = 2,45 \cdot 10^{-8} \left(\frac{V}{^{\circ}C} \right)^2 \quad (7.27)$$

ويسمى هذا الرقم رقم لورنس (Lorenz) الذي أوجد هذه العلاقة والتي تعد ثابتة تقريبا في أكثر المعادن العملية .

إن كل التغيرات والعوامل التي تؤثر في ناقلية المعادن والخلائط المعدنية للتيار الكهربائي تؤثر بالشكل نفسه في ناقلية هذه المعادن والخلائط للحرارة . فالبورات ذات الهياكل الشبكية المكعبة تختلف ناقليتها للحرارة باتجاه المحور الرئيس عنها بالاتجاهات الأخرى . كما أن المعادن الفيروالمغناطيسية تتغير ناقليتها للحرارة عند نقطة التحول المغناطيسي بالشكل نفسه الذي تغيرت فيه ناقليتها للكهرباء . وناقلية المعادن للحرارة تنخفض عند الانصهار ماعدا ناقلية كل من البزموت والغاليوم والأتسيومان فانها تزداد . وكل ما ذكرناه بالنسبة لناقلية التيار الكهربائي ينطبق بحذافيره على ناقلية الحرارة .

والخلائط القابلة للتحول الآلوتروبي أثناء تغير درجة الحرارة لا تكون ناقليتها للحرارة واحدة في مختلف حالاتها الآلوتروبية بل تتغير وهذا التغير قد يكون ذا أهمية كبيرة .

٧ - ٤ - الخواص الكهروحرارية للمعادن والخلائط المعدنية :

يمكن إيجاز الخواص الكهروحرارية للمعادن والخلائط المعدنية في ثلاث ظواهر أساسية وذلك كمايلي :

١ - ظاهرة سيبيك (Seeback) : إذا وصلنا سلكين من معدنين مختلفين على شكل دائرة مغلقة وجعلنا فرقاً في درجة الحرارة بين نقطتي الوصل الأولى والثانية فإن توتراً أو قدرة محرّكة كهربائية سوف تنشأ في هذه الدائرة • ومقدار هذا التوتر يتعلق بالفرق بين درجتي حرارة نهايتي السلكين حيث :

$$E = a + b t + c t^2 \quad (7.28)$$

حيث :

- a و b و c - ثوابت تتعلق بنوع المعدنين المستعملين •
- t - الفرق بين درجتي حرارة نهايتي الوصل •
- E - التوتر الناتج مقدراً بالميلي فولت •

كثيراً ما نستفيد من هذه الخاصة في قياس درجات الحرارة وصنع مقاييس للحرارة تعتمد على هذه الظاهرة وذلك بلحم شريطين من معدنين مختلفين ثم وصل نهايتيهما الحرّتين ببعض عن طريق مقياس فولت دقيق • وبوضع النهاية الملحومة في وسط درجة حرارته أكبر من الدرجة العادية فإن مقياس الفولت سيشير إلى توتر ما يتعلق بمقداره بدرجة الحرارة التي وضعت فيها النهاية الملحومة • ويسمى هذا التوتر الناتج القوة الحرارية للشريطين • ولكل معدن مع معدن آخر قوة حرارية ثابتة وتقاس هذه القوة عادةً لكل معدن على حدة وذلك بازدواج شريط أو سلك من المعدن المعني مع سلك مماثل من البلاتين وقياس التوتر الناتج عن تسخين نهايتهما الملحومة إلى ١٠٠° مئوية • وتدرج القيم الناتجة في جداول يمكن استعمالها في مقاييس الحرارة التي تعتمد على هذا المبدأ حيث يكون التوتر الناتج في مقياس الحرارة عند درجة حرارة معينة هو الفرق بين القوة الحرارية للمعدنين المستعملين في تلك الدرجة • وتقاس القوة الحرارية للخلائط المعدنية بالطريقة نفسها التي تقاس بها القوة الحرارية للمعادن النقية - أي بمقارنتها بالبلاتين • وللحصول على فكرة

واضحة عن تغير القوة الحرارية لخليطة ما بتغير نسب العناصر الداخلة في تركيبها علينا أن تتبع طريقة شبيهة بتلك التي اتبعناها عند إنشاء مخطط توازن الخليطة - أي بأخذ عدد من العينات تتراوح في تركيزها بين ١٠٠٪ للبعدن الأول وحتى ١٠٠٪ للمعدن الآخر ويتم قياس القوة الحرارية لكل عينة على حدة ثم تجمع النتائج في جدول أو في مخطط شبيه بمخطط التوازن •

٢ - ظاهرة بلتير (Peltier) : إذا مر تيار كهربائي في قطعتين معدنيتين ملحومتين فانه بالإضافة لحرارة جول تنطلق من مكان اللحام كمية من الحرارة تتعلق بشدة التيار والزمن حسب العلاقة التالية :

$$Q_p = \pi \cdot I \cdot \tau \quad (7.29)$$

حيث :

- I - شدة التيار الكهربائي المار بالقطعتين الملحومتين •
- τ - زمن مرور التيار •
- Q_p - كمية حرارة بلتير والتي قد تكون موجبة أو سالبة - أي التي قد تعمل على تسخين الوسط المحيط بها أو تبريده وذلك حسب اتجاه التيار الكهربائي •

٣ - ظاهرة تومسون (Thomson) : إذا مر تيار كهربائي في معدنين تختلف درجة حرارتهما فان كمية من الحرارة تنطلق من نقطة اتصال هذين المعدنين • وتتعلق كمية الحرارة المنطلقة بشدة التيار والفرق في درجة الحرارة بين المعدنين وبعامل ثابت يتعلق بطبيعة هذين المعدنين •

٧ - ٥ - الخواص المغناطيسية للمعادن والخلائط المعدنية :

تصنف المعادن والخلائط المعدنية حسب تأثير الساحة المغناطيسية فيها الى نوعين :

أ - ديامغناطيسية (Diamagnetic) : وهي المعادن والخلائط المعدنية التي تعمل على تفريق خطوط الساحة المغناطيسية • فاذا وضعنا قطعة من معدن (مثلاً) وكانت هذه القطعة على شكل قضيب في ساحة مغناطيسية فان هذا القضيب يحاول أن يأخذ وضعاً عمودياً على اتجاه خطوط الساحة المغناطيسية •

ب - بارامغناطيسية (Paramagnetic) : وهي المعادن والخلائط المعدنية التي تعمل على تجسيع (أو تكثيف) خطوط الساحة المغناطيسية • فاذا وضعنا قضيباً من معدن بارامغناطيسي في ساحة مغناطيسية فان هذا القضيب يعمل دائماً على أن يأخذ اتجاهاً موازياً لخطوط تلك الساحة • ويستعمل المعياران التاليان للتمييز بين المعادن الديامغناطيسية والمعادن البارامغناطيسية :

١ - قابلية النفوذ المغناطيسي (μ) : فاذا كانت قابلية النفوذ المغناطيسية لمعدن ما أقل من 1 (أي أن : $\mu < 1$) فان هذا المعدن ديامغناطيسي ، وإذا كانت $\mu > 1$ فان المعدن يتمتع بخواص بارامغناطيسية •

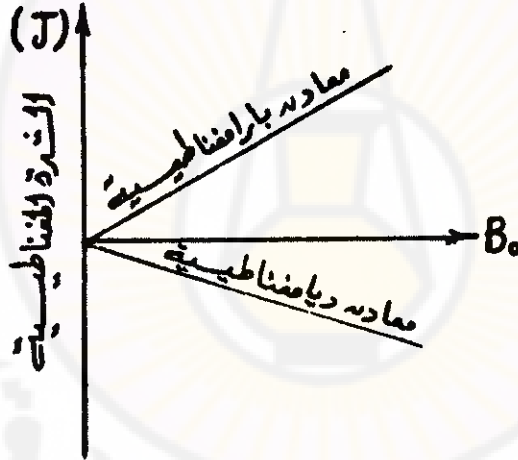
٢ - قابلية التمغنط (χ) : فاذا كانت قابلية التمغنط لمعدن ما أقل من الصفر (أي أن $\chi < 0$) فان هذا المعدن ديامغناطيسي ، وإذا كانت ($\chi > 0$) فان المعدن يتمتع بخواص بارامغناطيسية • وقابلية التمغنط χ هي عامل التناسب في العلاقة التالية (انظر الشكل ٧ - ٢) •

$$J = \chi B_0$$

(7.30)

حيث : J - الشدة المغناطيسية •
 B_0 - التحريض المغناطيسي •

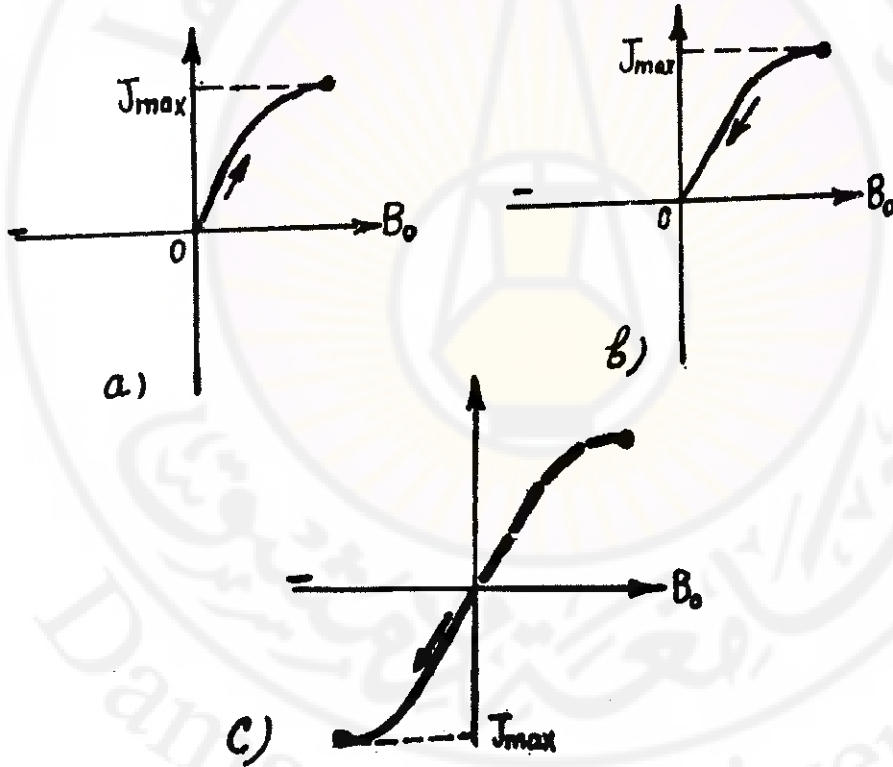
إن أكثر المعادن والخلائط المعدنية ذات قابلية تقود مغناطيسية قريبة جداً من الواحد (أي أن μ لا تزيد كثيراً عن الواحد) مما يجعل تأثيرها بالساحة المغناطيسية ضعيفاً ، لهذا فإن قيمة خواصها المغناطيسية من الناحية العملية ليست ذات أهمية ما عدا ثلاثة معادن هي الحديد والنيكل والكوبالت حيث تتمتع هذه المعادن الثلاثة بخواص بارامغناطيسية قوية أي أن : ($\mu \gg 1$ و $\chi \gg 0$) لهذه المعادن • وتسمى



الشكل (٧ - ٢) : العلاقة بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي للمعادن البارامغناطيسية والديامغناطيسية .

هذه المعادن الفرومغناطيسية • وتبقى علاقتهم بالتناسب بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي موجودة في هذه الحالة إلا أن هذه العلاقة ليست خطية كما لبقية المعادن وإنما العلاقة هي من النوع المنحني • وليان نوعية هذه العلاقة لا بد لنا من أن نذكر أن المعادن الفيرومغناطيسية تقسم إلى فئتين :

٢ - المعادن اللينة مغناطيسيا : والمقصود بالليونة المغناطيسية هو أن يكون المعدن ذا قابلية جيدة للمغنطة ويتخلى عن هذه المغنطة بسهولة أيضا وبدون أن تكون القدرة الضائعة كبيرة . ويبيّن الشكل (٣ - ٧) نوعية العلاقة بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي في المعادن اللينة مغناطيسيا . فمن الشكل (٣ - ٧) a) نلاحظ أن الشدة المغناطيسية تزداد بازدياد التحريض المغناطيسي لتصل الى حد معين لا تزداد بعده ، ويُسَمَّى حد الاشباع . ولكن الشكل (٣ - ٧) b) يبيّن أن الشدة المغناطيسية تزول عند زوال التحريض المغناطيسي حتى تعود الى الصفر . وإذا تم التأثير في المعدن اللين مغناطيسيا بتحريض مغناطيسي



الشكل (٣ - ٧) : العلاقة بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي عند المعادن اللينة مغناطيسيا .

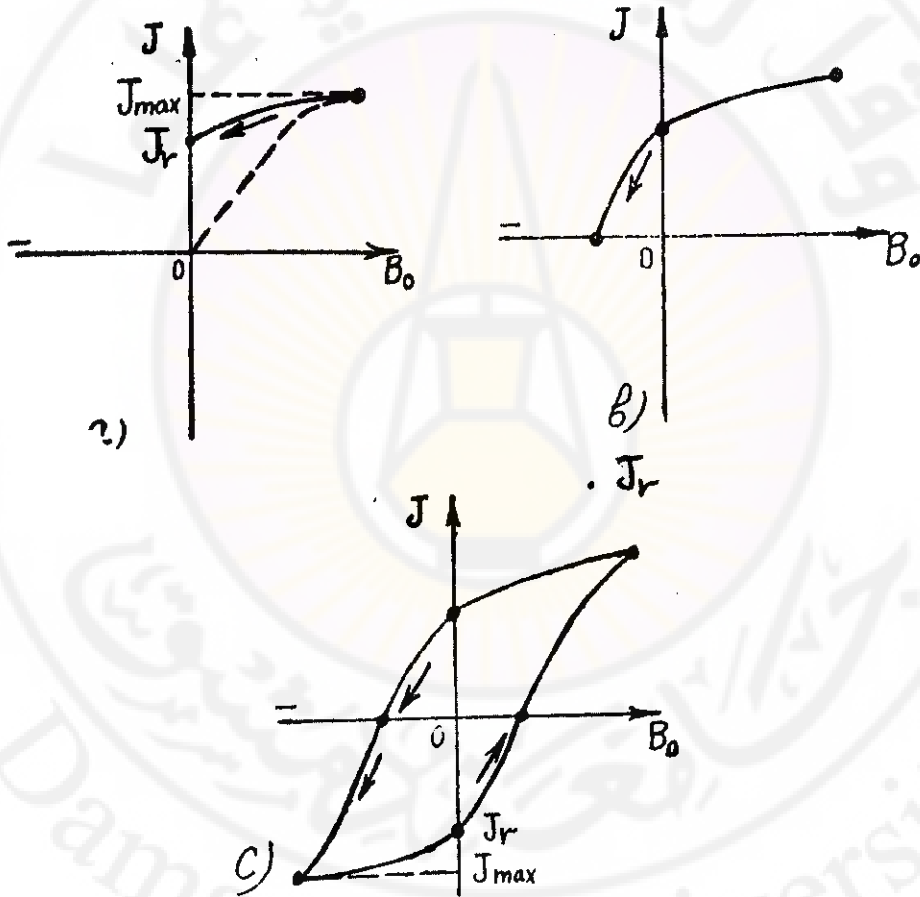
معاكس للتحريض الأول فان الشدة المغناطيسية تزداد هنا أيضا ولكن باتجاه يختلف عن الاتجاه السابق ولتصل الى قيمة عظمى لا تزداد بعدها مهما ازداد التحريض • من هنا نلاحظ أن المعادن اللينة مغناطيسيا تتأثر بشكل جيد بالمجال المغناطيسي الموجودة به ولكن دون أن يترك بها أي خلفية مغناطيسية — أي أن ما يسمى مجال الهسترة معدوم في هذه المعادن أو صغير جدا لدرجة يمكن إهماله •

إن أول المعادن اللينة مغناطيسيا هو الحديد النقي غير أن الحصول على الحديد النقي ليس بالأمر السهل أو قليل الكلفة مما يجعل استعمال هذا الحديد النقي كمعدن ليس مغناطيسيا متعذرا ، وبستعمل بدلاء منه بعض أنواع الفولاذ الطري التي تسمى عادة أنواع الحديد اللين • وعلى الرغم من كون الحديد النقي من أجود ما يمكن استعماله في الأغراض التي تحتاج الى ليونة مغناطيسية فان مقاومته الكهربائية صغيرة وباستعماله في الآلات الكهربائية أو المحولات يجعل القدرة الضائعة كبيرة ، ولانقاص مقدار هذا الضياع هناك عدة طرق أهمها انقاص مقطع الصفائح المستعملة (بصنع صفائح رقيقة جدا) من جهة وإضافة بعض العناصر السبائكية من جهة أخرى •

أما بالنسبة للخلائط اللينة مغناطيسيا فيشترط فيها بالإضافة الى مجال الهسترة الصغير جدا (أو المعدوم) أن تكون قابلية نفوذها المغناطيسية كبيرة وذلك كي تتأثر بالساحة المغناطيسية وهناك كثير من الخلائط اللينة مغناطيسيا مثل خايطه : الحديد — النيكل، الحديد — النيكل — الكروم ، الحديد — الموليبدنيوم وغيرها •

ب — المعادن القاسية مغناطيسيا : وهي المعادن القادرة على الاحتفاظ بمغناطيسيتها حتى بعد زوال الساحة المغنطة • ومعروف عن هذه المعادن أنه كلما كانت قابلية نفوذها المغناطيسية أكبر كانت استطاعتها المغناطيسية أكبر ، وكلما كبر مجال الهسترة فيها ازدادت مقدرتها على الاحتفاظ بمغناطيسيتها • ويبين الشكل (٧ — ٤) علاقة الشدة المغناطيسية بالتحريض المغناطيسي لهذه المعادن من جهة

والمعنى احتفاظ هذه المعادن بمغناطيسيتها بعد زوال التحريض المغناطيسي من جهة أخرى . فعلى الشكل (٧ - ٤) نلاحظ أن الشدة المغناطيسية تزداد بازدياد التحريض المغناطيسي حتى تصل إلى حد الاشباع J_{max} وعند زوال الساحة المغناطيسية المؤثرة تدريجياً لتصل إلى الصفر فإن الشدة المغناطيسية لا تتلاشى بل تبقى بعض المغناطيسية الباقية (J_r) . ولإزالة هذه المغناطيسية الباقية يجب



الشكل (٧ - ٤) : العلاقة بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي عند المعادن القاسية مغناطيسياً .

وضع المعدن تحت تأثير تحريض مغناطيسي معاكس بالاتجاه للتحريض الأول (انظر الشكل ٧ - ٤ (b)) ومن الشكل (٧ - ٤ (c)) نلاحظ أنه إذا ازدادت قيم التحريض المغناطيسي العكسي فإن الشدة المغناطيسية تزداد بالاتجاه المعاكس أيضاً حتى تصل إلى حد الإشباع J_{max} (ولكن بالاتجاه المعاكس للأول) . ومرة أخرى نلاحظ من الشكل أنه إذا زال التحريض المعاكس فإن هناك مغناطيسية باقية $(-J_r)$ ، وإلازالتها يجب تطبيق تحريض مغناطيسي وفق الاتجاه الأول وهكذا . ومن هنا نستنتج أن تأثير ساحة مغناطيسية في معدن قاسي مغناطيسياً ثم زوال هذه الساحة ينتج عنه وجود مغناطيسية باقية في هذا المعدن . والمعادن التي تتمتع بخاصية الاحتفاظ بالمغناطيسية لاتصلح في صناعة المحولات وغيرها من القطع التي تخضع لمجالات مغناطيسية متغيرة وإنما تصلح في صناعة المغناطيس الدائم . وأقدم ما يعرف من المعادن القاسية مغناطيسياً هو فلز الحديد المسمى المغنايت والذي يدعى أيضاً بالحجر المغناطيسي . أما كمغناطيس دائم صناعي فأول ما استعمل هو الفولاذ المحتوي على نحو ١٪ كربوناً والمجراة له عملية سقاية . ومنذ عام ١٨٨٠ بدأ العلماء والباحثون العليون في هذا المجال بتطوير صناعة المغناطيس الدائم فابتكروا الفولاذ المحتوي على ٦٪ تنجستيناً ثم الفولاذ المحتوي على ٣٥٪ كروم . بعد ذلك تم ابتكار عدد من الخلائط الارخص بكثير من الفولاذ الكرومي السابق والاكثر منه استطاعة وأهم هذه الخلائط هي خلائط الحديد مع النيكل والكوبالت والألمنيوم أو الحديد والنيكل والألمنيوم . . . إلخ .

٧ - ٦ - انتشار الفترات في المعادن والخلائط المعدنية :

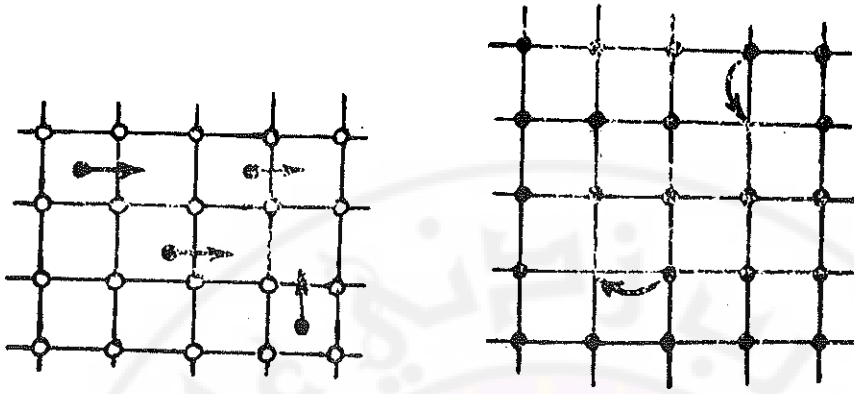
نحن نعلم أن ذرات المعدن غير مستقرة في أماكن توضعها في عقد الهياكل

الشبكية حتى في درجة الحرارة العادية والسالبة وإنما هي في حركة اهتزازية دائمة حول مكان توضعها في هذه العقد • ويتعلق كل " من تردد الاهتزاز وسعته بدرجة الحرارة • فعند ارتفاع درجة حرارة الذرات تزداد سعة الاهتزاز وينخفض التردد في الوقت نفسه ولا تنعدم الحركة الاهتزازية للذرات إلا في درجة الصفر المطلق • وتتراوح قيم تردد الاهتزاز بـ $(\nu = 10^{12} \div 10^{13} \text{ Hz})$ ، وأما سعة الاهتزاز فهي بحدود 10^{-12} من طول ضلع الهيكل الشبكي • وتعيّن القدرة الاهتزازية للذرات من المعادلة التالية :

$$W = 3 k T \quad (7.31)$$

حيث : k -- ثابت بولتزمان ويساوي : $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/sec}$ •
 T -- درجة الحرارة المطلقة •

والقدرة الاهتزازية هذه ليست متساوية في جميع الذرات وإنما تختلف من ذرة لأخرى وحتى في الذرة نفسها تتبدل هذه القدرة بين لحظة وأخرى وذلك بسبب التأثير المتبادل بين الذرات ، فالذرة يمكن أن تعطي للذرات المجاورة جزءاً من قدرتها هذه أو أن تكتسب منها • فإذا اكتسبت الذرة قدرة إضافية من الذرات المجاورة فإن سعة الاهتزاز تزداد ويمكن للذرة أن تصبح في وضع غير مستقر • وعند قيمة معينة لسعة الاهتزاز يمكن لهذه الذرة أن تنفصل عن جاراتها من الذرات الأخرى وتنتقل إلى عقدة أخرى ولتستقر بين ذرات أخرى • وتفقد الذرة جزءاً من قدرتها أثناء انتقالها وتعطيها لذرات أخرى حتى إذا وصلت إلى مكانها الجديد عادت إلى حالة الاستقرار ضمن مجال التوازن • ويمكن لعملية الانتقال هذه أن تتكرر وللذرة نفسها • وهكذا تهاجر الذرة داخل المعدن من مكان إلى آخر وخطوة خطوة • ويسمى هذا الانتقال التدريجي للذرة الانتشار • ويجب أن نميز هنا بين حالتين الانتشار هما :



الشكل (٧ - ٦) : انتشار الذرات
الغريبة في المركبات التداخلية

الشكل (٧ - ٥) : انتشار الذرات عبر
عقد الهياكل الشبكية في المحاليل الصلبة
لتبادلية أو المعادن النقية .

أ - يمكن أن يتم الانتشار عبر عقد الهياكل الشبكية الأساسية - أي أن
الذرة تنتقل من عقدة موجودة بها إلى عقدة فارغة (انظر الشكل ٧ - ٥) .
ويحدث مثل هذا النوع من الانتشار في المحاليل الصلبة التبادلية وفي المعادن النقية .
وتدعى ظاهرة الانتشار هذه في حالة المعادن النقية الانتشار الذاتي .

ب - يمكن أن تهاجر الذرات الغريبة الموجودة بين ذرات المعدن الأساسي
من مكان إلى آخر . وفي أغلب الأحيان تكون هذه الذرات الغريبة صغيرة الحجم .
ويحدث هذا النوع من الانتشار في المركبات التداخلية (انظر الشكل ٧ - ٦) .

تدعى القدرة اللازمة لانتقال الذرة من مجال توازنها إلى مجال آخر بالقدرة
التشيعية (أو القدرة الفعالة) . وكلما كانت القدرة النشطة لمعدن ما كبيرة كان احتمال
انتقال الذرة عن عقدة إلى أخرى أصغر والعكس صحيح . ولقد بيننا سابقاً
(الفصل الثاني) العلاقة بين تركيز الثقوب (أي النسبة بين العقد الفارغة والعقد
الكلية في الهيكل) بكل من الطاقة التشيعية ودرجة الحرارة وذلك من خلال
العلاقة التالية :

$$\frac{n}{N} \simeq e^{-E/KT} \quad (7.32)$$

أما سرعة الانتشار فيمكن التعبير عنها من خلال عامل الانتشار D والذي يُعرّف على أنه كمية المعدن مقدرة بالذرة الغرامية (gramatom) التي تنتشر عبر مساحة قدرها 1 cm^2 خلال زمن قدره 1 sec . ويعطى عامل الانتشار بالعلاقة التالية:

$$D = A e^{-E/KT} \quad (7.33)$$

حيث: A - ثابت التناسب ويتعلق بنوع المعدن ويتناسب هذا الثابت طردياً مع مربع البعد بين الذرات •

إن لظاهرة الانتشار هذه أهمية كبيرة في الصناعة في الوقت الحاضر ، إذ باستغلال هذه الظاهرة يمكننا الحصول على خلائط معدنية وهي في حالتها الصلبة (أي دون اللجوء إلى صهر العناصر الأساسية المشكلة لهذه الخليطة) ، كما يمكننا إدخال ذرات عنصر إلى الطبقات السطحية لقطعة معدنية (كما في حال كربنة الفولاذ) وذلك بغية إكساب السطح خواص ميكانيكية معينة بعد إجراء المعالجة الحرارية المناسبة • وتستخدم هذه الظاهرة في إحدى طرق لحام الضغط وهي طريقة اللحام بالانتشار حيث تتم عملية اللحام هذه في وسط مخلخل تماماً من الهواء وتنتقل الذرات عبر سطح القطعتين المتلامستين والمراد لحامهما وتشكل الوصلة اللحامية دون اللجوء لعملية الصهر الموضعي للقطعتين أو تطبيق قوى ضغط كبيرة عليهما •

* * *

الفصل الثامن

الخواص الميكانيكية للمعادن والخلائط المعدنية واختباراتها

إن المواد المستعملة في الانشاءات الهندسية سواءً أكانت معدنية أم غير معدنية يجب أن تتمتع بعدد من الخواص المختلفة والمتفاوتة بحيث نستطيع اختيار المادة المناسبة لكل غرض من الأغراض ، وبحيث تتناسب خواصها مع العمل الذي يجب أن تؤديه . فعند اختيار مادة لصنع قطعة من آلة ما فإن هذه المادة يجب أن تتصف بخواص تجعلها قادرة على تحمل ماقد يؤثر في هذه القطعة من قوى دون أن تنكسر أو دون أن يتغير شكلها ، وبالوقت نفسه يجب أن تكون هذه المادة عند تطبيق قوى معينة عليها قابلة لتغيير شكلها وإلا ما استطعنا اعطاءها الشكل المناسب أثناء تصنيعها . وهكذا فإن الخواص الميكانيكية هي تلك التغيرات التي تبيدها المادة بتأثير القوى المؤثرة فيها أثناء التشكيل أو التشغيل أو التحميل بأحمال مختلفة .

واختبارات الخواص الميكانيكية يمكن تصنيفها بصورة عامة في فئتين :

الفئة الأولى : هي تلك الاختبارات التي نحصل منها على وحدات قياسية تميز المادة المختبرة ويمكن في أغلب الأحيان الاستنادة من هذه الوحدات في الحسابات التصميمية .

الفئة الثانية : هي تلك الاختبارات التي غالباً ما تكون الوحدات المستنتجة منها غير صالحة للاستعمال في الحسابات التصميمية وإنما تقتصر فائدتها على تصنيف

المادة من حيث قابليتها أو عدم قابليتها للاستجابة لعملية تكنولوجية ما ، وتُسمى اختبارات الفئة الثانية الاختبارات التكنولوجية ومنها مثلا اختبار قابلية المعدن للسحب وقابليته للسكب وقابليته للثني وغيرها وتدرس هذه الاختبارات عادة مع دراسة العمليات التكنولوجية المتعلقة بها .

وإضافةً لهاتين الفئتين هناك مجموعة من الاختبارات يمكن تصنيفها في فئة مستقلة . والغاية من هذه الاختبارات عادةً هي الكشف عن العيوب أو الأخطاء التي قد توجد في القطع المعدنية المصنعة أو الملحومة . ولقد تعرفنا على أسس هذه الاختبارات في فصل « سبل التعرف على البنية الداخلية للمعادن ورقابة جودتها » . إن اختبارات الفئة الأولى تقسم بدورها إلى ثلاث فئات أو مجموعات وذلك حسب طبيعة القوى أو الأحمال المطبقة على عينات الاختبار من جهة وحسب ظروف التحميل من جهة أخرى وذلك على النحو التالي :

١- الاختبارات الستاتيكية : وتكون القوى المؤثرة المسنعة في هذه الاختبارات إما ثابتة أو متغيرة ببطء شديد .

٢- الاختبارات الديناميكية : وتكون القوى المؤثرة في عينات الاختبار في هذه المجموعة هي قوى متغيرة باستمرار أو أن تطبيق القوة يتم بسرعة كبيرة .

٣ - الاختبارات في ظروف مغايرة للظروف الطبيعية « العادية » : وتتم هذه الاختبارات في درجات حرارة مرتفعة أو في درجات حرارة منخفضة . أما القوى المؤثرة فيمكن أن تكون ذات طبيعة استاتيكية أو ديناميكية .

الاختبارات الستاتيكية

وأهم هذه الاختبارات : الشد ، الضغط ، الانحناء ، القتل ، القص وقياس
القساوة (الصلادة السطحية) •

٨-١- اختبار الشد :

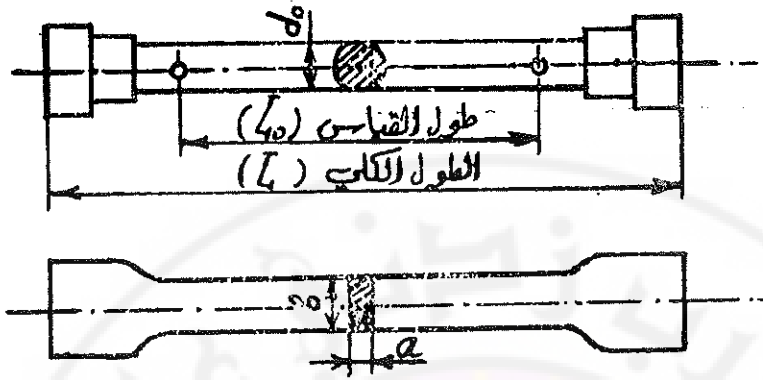
يُعرف اختبار الشد على أنه : إخضاع عينة ذات أبعاد معروفة الى حمل
شد ستاتيكي أحادي المحور مع مراقبة سلوك العينة من لحظة بدء تطبيق الحمل
وحتى الانكسار • ويعد اختبار الشد من أهم الاختبارات الميكانيكية للقطع
المعدنية والوصلات بسائر أنواعها وذلك لكثرة الوحدات القياسية المستتجة من
هذا الاختبار وأهمية هذه الوحدات في الحسابات التصميمية إضافة لاعتماد جزء
كبير من هذه الوحدات كمواصفات قياسية في تحديد جودة المعدن أو الوصلة •

٨-١-١- اختيار العينات :

تستخدم لاختبار الشد عينات " نظامية اتفق على شكلها وأبعادها دولياً ذلك
لأن الدقة في اختيار عينة الشد واعدادها بشكل صحيح يؤثران وبشكل واضح
في دقة النتائج التي نحصل عليها من هذا الاختبار • ويجب أن نعتد في اختيار
عينة الشد على ثلاثة أسس رئيسة وهي :

١- يجب أن تكون العينة معدة من المادة نفسها المراد اختبارها وأن تكون
سطوحها نظيفة وناعسة وذلك حتى لا تلعب الخدوش أو الحزوز أو الميوب السطحية
الأخرى دوراً في النتائج العملية التي نحصل عليها •

٢- يجب أن لا تتحقق عينة الشد وجود حالة الاجهاد السطحي أو الانفعال
السطحي أثناء الاختبار •



الشكل (٨ - ١) : عينات اختبار الشد

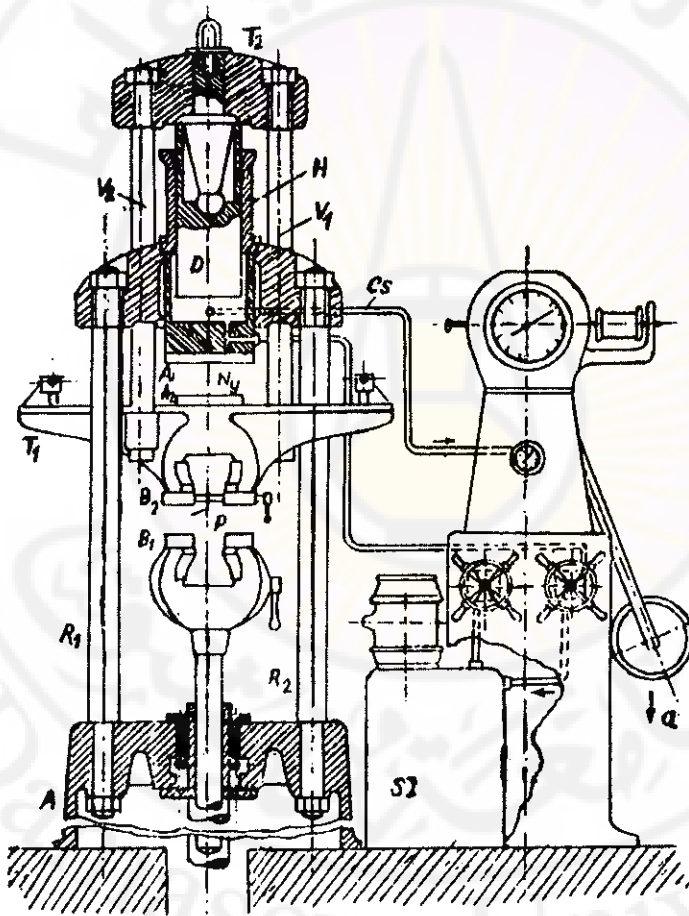
٣ - إذا لم تتوفر الآلة التي نستطيع أن نخبر عليها عينات نظامية فانه يتم اختبار عينات وفق المواصفات المعتادة وذلك حتى يكون هناك إمكان للمقارنة . ويوضح الشكل (٨ - ١) الشكل العام للعينات المستخدمة في تجربة الشد . وكما هو واضح من الشكل فان مقطع العينة يكون إما دائرياً أو مستطيلاً أو مربعا .

٨ - ١ - ٢ - الآلات المستخدمة في اختبار الشد :

تتنوع الآلات المستعملة في اختبار الشد بشكلها وحجمها ، فمنها الصغيرة التي لا تزيد استطاعتها عن بضعة كيلو غرامات والمتوسطة (بضعة أطنان) والكبيرة التي تبلغ استطاعتها عشرات الاطنان بل مئات . وغالباً ما تكون الآلات الصغيرة ميكانيكية ، أما المتوسطة والكبيرة فهي على الاغلب هيدروليكية التحميل . والآلات الصغيرة والكبيرة غالباً ما تستخدم في أغراض خاصة ، أما الآلات الأكثر استعمالاً وعلى نطاق واسع فهي الآلات المتوسطة .

ويبين الشكل (٨ - ٢) رسماً توضيحياً لاحدى هذه الآلات والتي تتألف من رأسين زوّد كل منهما بقبض لتثبيت رأس العينة أحدهما B_1 ثابت مع

جسم الآلة (يمكن تعويره يدويا ثم تثبيته) والآخر B_2 متحرك لكونه مثبتا مع المكبس المتحرك بواسطة المحاور الدلية V_1 و V_2 والقاعدة T_1 . فعند ضخ الزيت بواسطة المضخة S الى اسطوانة المكبس H يتحرك المكبس D الى الأعلى ويحرك معه الرأس B_2 بقاعدته الثقيلة T_1 ويشد العينة المربوطة بين المقبضين B_1 و B_2 ، أما العينات المعدة لاختبار الضغط فتوضع بين الوجهين A_1 الثابت مع جسم الآلة والوجه A_2 المتحرك والذي ماهو إلا الوجه العلوي لقاعدة



الشكل (٨ - ٢) : آلة اختبار الشد الهيدروليكية .

الرأس المتحرك T_1 . ويستمر شد العينة أو ضغطها حتى تنكسر أو تتحطم ، وخلال مرحلة التحميل هذه يتم وباستمرار قياس القوة المطبقة على العينة بواسطة مقياس ضغط يقيس ضغط السائل في اسطوانة المكبس عن طريق الأنبوب CS ، كما تقاس في هذه الأثناء استطالة العينة .

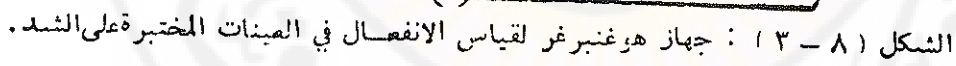
٨ - ١ - ٣ - قياس الانفعال :

يتم قياس الانفعال عن طريق قياس الاستطالة . ويمكن قياس الاستطالة باستخدام إحدى الطرق الأربع التالية :

١- الطريقة البسيطة : تؤخذ العينة بعد أنكسارها ويوضع جزءاها الى جانب بعضهما ويقاس طول العينة ، فالفرق الحاصل بين طول العينة (بعد الانكسار) وطولها الاصيلي (أي قبل الاختبار) هو الاستطالة الكلية للعينة . وتعد هذه الطريقة أقل طرق قياس الانفعال دقة .

٢- الطريقة الميكانيكية : تستخدم لقياس الانفعال بالطريقة الميكانيكية أجهزة قياس كثيرة ومتنوعة تسمى التزومترات ، ويتلخص المبدأ الاساسي فيها في قياس البعد بين نقطتين من سطح العينة قبل التحميل وأثناءه . وأكثر أجهزة قياس الانفعال ميكانيكياً انتشاراً هو جهاز هو غنبرغر (Huggenberger) ، حيث يحتوي هذا الجهاز على ذراعين مزود كل منهما برأس مدبب أحدهما ثابت ، والآخر متمفصل في نقطة ارتكازه ويستطيع الحركة (أو بالأحرى الدوران) حول رأس ارتكازه أثناء التحميل .

يُثبت الجهاز على العينة بحيث يلامس كل من رأسيه المذكورين سطح العينة لتكون المسافة بينهما هي الطول (L_0) المراد قياس استطالته ، فعند الشد تبدأ القطعة بالاستطالة بمقدار ΔL مما يؤدي الى انتقال الرأس الدوار بهذا المقدار



• انتقال للنهية الأخرى لهذا الذراع بسقدار ΔS

نقطة نفسها وبوساطة ابرة المؤشر ، أي أن :

$$\frac{\Delta S}{\Delta L} = \frac{L_2}{L_1} \Rightarrow \Delta S = \Delta L \frac{L_2}{L_1}$$

$$\frac{\Delta L'}{\Delta S} = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \Rightarrow \Delta L' = \Delta S \frac{m_1 + m_2}{m_1} \quad (8.2)$$

$$\frac{\Delta L'}{\Delta L} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} \quad (8.3)$$

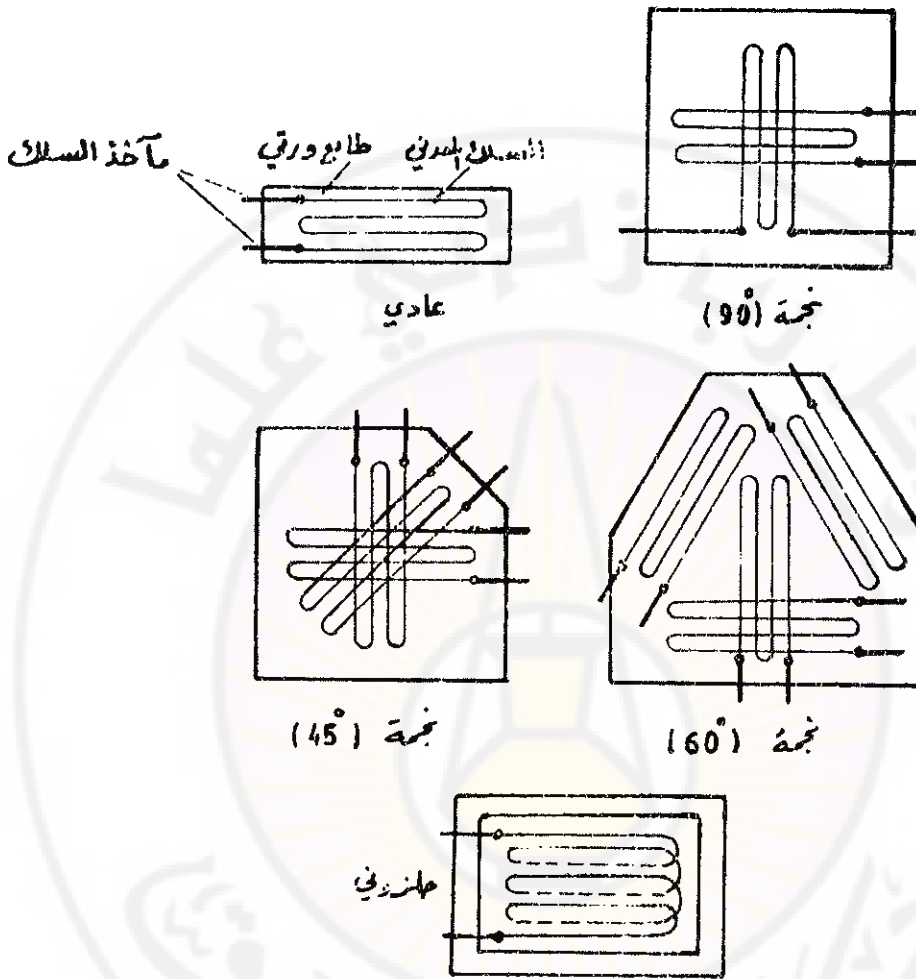
ولا بد هنا من التنويه الى أن الخطأ النسبي الحاصل بهذه الطريقة يكون كبيراً في بعض الأحيان اذا ما قورن بطرق أخرى أكثر دقة وسببه الانزلاق الذي يحدث أثناء التجربة ، وعلى الرغم من كل هذا فإن هذا الجهاز يستخدم في قياس الانفعالات الناتجة عن التحميل الستاتيكي ، أما في قياس الانفعالات الديناميكية فهو نادر الاستخدام .

٣- الطريقة الكهربائية : تستعمل في القياسات الدقيقة للاستطالة أجهزة قياس كهربائية ، وأكثر هذه المقاييس استخداماً ذلك المسمى الطابع اللاصق وهو سلك معدني دقيق مثبت على صفيحة ورقية بشكل متعرج ، والشكل (٨ - ٤) يبين بعض أشكال هذه الطوابع التي تختلف فيها أوضاع الأسلاك المعدنية باختلاف الاتجاهات والمحاور التي نود قياس الاستطالة بموجبيها .

فعندما تبدأ العينة بالاستطالة يستطيل معها السلك المعدني ويتغير مقطعه وتتغير بالتالي مقاومته . فإذا علمنا أن :

$$\frac{dR/R}{dL/L} = K \quad (8.4)$$

- حيث :
- R - مقاومة السلك المعدني .
 - L - طول السلك المعدني .
 - K - عامل المقياس للسلك (أو حساسية الانفعال) .



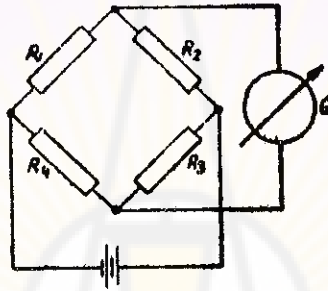
الشكل (٨ - ٤) : اشكال مختلفة للعوابع اللاصقة المستعملة في قياس الانفعالات.

وهذا يعني أن التغير في المقاومة الكهربائية لسلك يتناسب خطياً مع مقدار انفعاله . فإذا عرفنا مقدار التغير في مقاومة السلك وعرفنا عامل المقياس (K) فإننا نستطيع حساب انفعال هذا السلك من العلاقة السابقة :

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{K \cdot R} = (R_1 - R) \frac{1}{K \cdot R} \quad (8.5)$$

- حيث : R - مقاومة السلك قبل التحميل .
 R_1 - مقاومة السلك أثناء التحميل .

وتتم عملية القياس بوصل نهايتي سلك الطابع ليكون هذا السلك مقاومة من مقاومات جسر وتستون (السلك هو المقاومة R_1 في جسر وتستون المبين في الشكل ٨ - ٥) . فـأثناء التحميل يسر في الغالفانومتر تيار كهربائي يتناسب مع تغير المقاومة وبالتالي مع استطالة العينة .

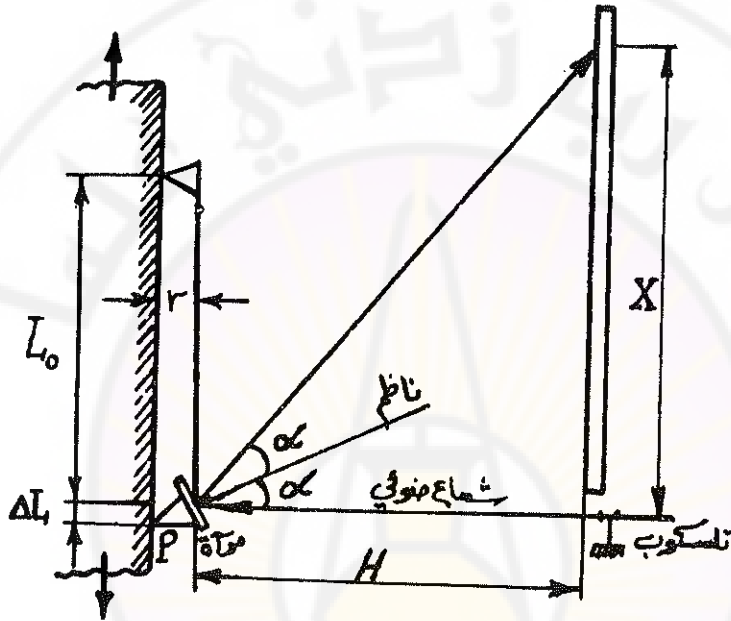


الشكل (٨ - ٥) : الطابع اللاصق عبارة عن احدى المقاومات في جسر وتستون .

عندما يبدأ بتحميل العينة وتبدأ هذه بالاستطالة تبدأ درجة حرارتها بالارتفاع وبالتالي ترتفع درجة حرارة السلك المعدني للطابع وهذا يؤثر في مقاومته الكهربائية، ولكي لا تتأثر نتائج القياس بتغير درجة الحرارة هذا يوضع عادةً على سطح العينة طابع آخر ويثبت عليها بشكل خفيف وذلك بحيث لا يستطيل وتوصل نهايتا سلك الطابع الجديد لتكون المقاومة الموازية للسلك السابق، R_1 (انظر الشكل ٨-٥) وعندئذ يصبح التيار المار في المقياس متناسبا فقط مع استطالة العينة .

٤- الطريقة الضوئية : يعتمد مبدأ هذه الطريقة على أن استطالة العينة تؤدي إلى دوران مرآة حول نقطة ثابتة مما يؤدي إلى تغير زاوية انعكاس

الشعاع الساقط على هذه المرآة وبالتالي يتغير بعد الشعاع المنعكس عن نقطة البداية • ومنه يمكن أن نعد أن البعد X في الشكل (٨ - ٦) يتناسب مع استطالة العينة •



الشكل (٨ - ٦) : مبدأ الطريقة الضوئية في قياس استطالة العينة المختبرة على الشد.

فإذا استطالت العينة فإن الرأس الحامل للمرآة يتحرك معها ويدور حول النقطة P مما يؤدي إلى ابتعاد الشعاع الضوئي المنعكس عن الشعاع الوارد على التدريج بمقدار X والتي تتناسب مع ΔL • وبالتالي يكون مقدار التكبير الحاصل في الاستطالة هو M ، حيث :

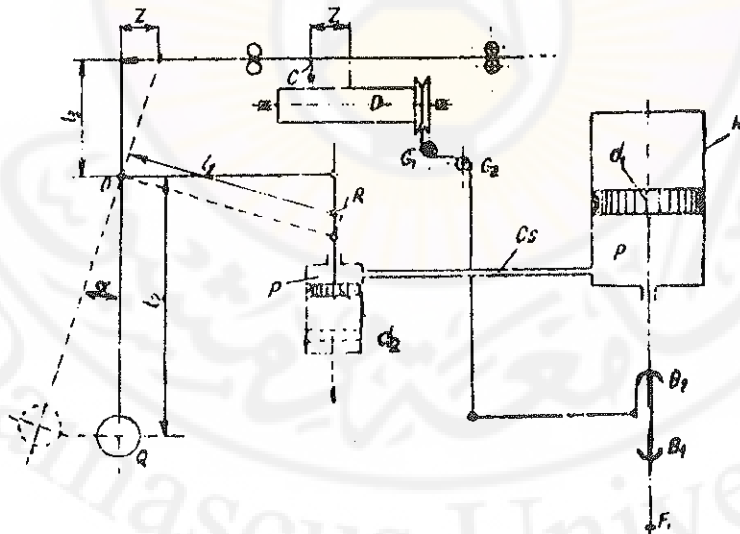
$$M = \frac{X}{\Delta L} = \frac{H \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{r \cdot \sin \alpha} \quad (8.6)$$

يكون البعد (r) عادةً بحدود (4.5 mm) وتؤخذ $(H = 250 r)$ ومنه تعد هذه

المقاييس من أكثر مقاييس الانفعال حساسية حيث أنه من الممكن أن تقرأ قيمة قدرها (0,1 mm) على التدريج وهذا يقابل استطالة مقدارها (0,0002 mm) .

٨ - ١ - ٤ -- كيفية الحصول على مخطط الاجهاد - الانفعال وخواص هذا المخطط :

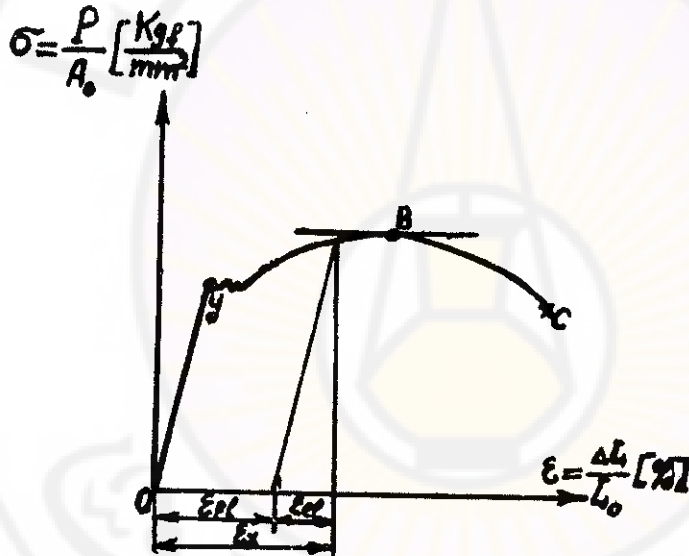
تقوم آلات الشد الحديثة برسم منحني الشد (أي مخطط الحمل - الاستطالة) مباشرة أثناء الاختبار . ففي الآلات الهيدروليكية مثلاً يتم رسم هذا المخطط بلف ورقة ميليمترية على اسطوانة يوجد على احدى نهايتها بكره يلف عليها خيط ويمر على عدد من البكرات ثم يربط بالرأس المتحرك لآلة الشد (انظر الشكل (٨ - ٧)) . ويرضع فوق الاسطوانة قلم مربوط بخيط وتربط احدى نهايتي هذا الخيط بنابض وتربط نهايته الاخرى بذيل نواس ثقلي يحركه عن وضع التوازن مكبس صغير يستمد ضغطه من ضغط مكبس آلة الشد نفسها ، وهكذا تكون حركة الاسطوانة الدورانية تحت القام متناسبة مع استطالة العينة بيناتكون



الشكل (٨ - ٧) : جهاز رسم منحنى الحمل - الاستطالة في آلة اختبار الشد.

حركة القلم المحورية فوق الاسطوانة متناسبة مع القوة المطبقة على العينة . وبهذا الشكل نحصل على مخطط الحمل - الاستطالة $(P - \Delta L)$.

يُرسَم مخطط الاجهاد - الانفعال من المخطط الأساسي $(P - \Delta L)$ وذلك بأخذ عدد كافٍ من نقاط منحنى المخطط $(P - \Delta L)$. وبما أن لكل نقطة الاحداثيات $(P, \Delta L)$ فنحن نقوم بتقسيم (P) على مساحة مقطع العينة الأولي قبل الاختبار (A_0) لنحصل على الاجهاد (σ) ، ونقسم (ΔL) على طول العينة الأولي أيضاً (L_0) لنحصل على الانفعال (ϵ) - انظر الشكل (٨-٨) .



الشكل ٨-٨ : مخطط الاجهاد - الانفعال .

نلاحظ على منحنى الاجهاد - الانفعال مرحلتين متميزتين عن بعضهما :

- ١- مرحلة المرونة : وتشمل هذه المرحلة مجال الاجهاد من الصفر وحتى حد معين يزول فيه الانفعال بزوال الاجهاد المطبق . ويمثل المستقيم $\overline{Oy}$ على الشكل (٨-٨) هذا المجال (تقريباً) . ويتعلق ميل هذا المستقيم بنوع المادة ويُسمى عامل المرونة أو عامل يونغ (Young) ويرمز له بالرمز (E) بحيث :

$$E = \operatorname{tg} \alpha \quad (8.7)$$

فإذا علم ميل المستقيم فإن معادلته تصبح :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (8.8)$$

وهي المعادلة المعروفة بقانون هوك (Hooke) .

٢ - مرحلة اللدونة : وهي المرحلة التي تلي مرحلة المرونة مباشرة وتشمل مجال الاجهاد من حدود المرونة وحتى الانكسار ، وبازالة الاجهاد يزول جزء من الانفعال بشكلٍ يوازي مستقيم المرونة σ_0 (وهو الجزء المرن من الانفعال) ، أما الجزء الآخر من الانفعال فلا يزول وهو الجزء اللدن . لهذا تسمى هذه المرحلة مرحلة اللدونة .

من الشكل (٨ - ٨) يمكن أن نكتب :

$$\epsilon_x = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} \quad (8.9)$$

ونستطيع أن نميز على منحنى الاجهاد - الانفعال ثلاث نقاط هي :

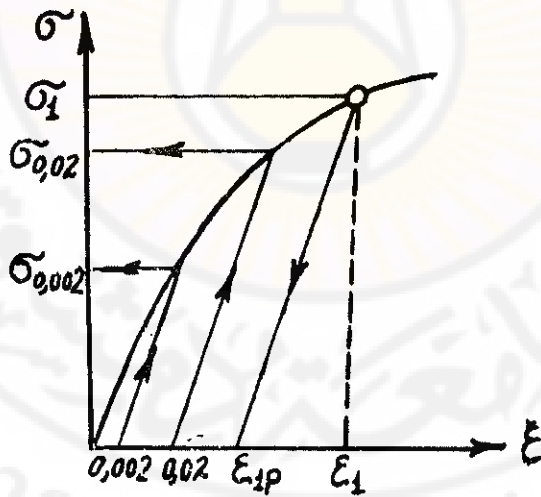
١ - النقطة γ : وتُبيّن حد الانسياب (أو حد الخضوع) للمادة المختبرة .

٢ - النقطة B : وتُبيّن حد الإجهاد الأعظمي الذي تتحمّله المادة أثناء الشد .

٣ - النقطة C : وتُبيّن الجهد المطبق على المادة في لحظة انكسار العينة .

إن معرفة النقطة التي يبدأ عندها الانفعال اللدن أمرٌ في غاية الأهمية لكون تلك النقطة هي حد المرونة الفعلي للمادة . غير أن تحديد تلك النقطة بأجهزة

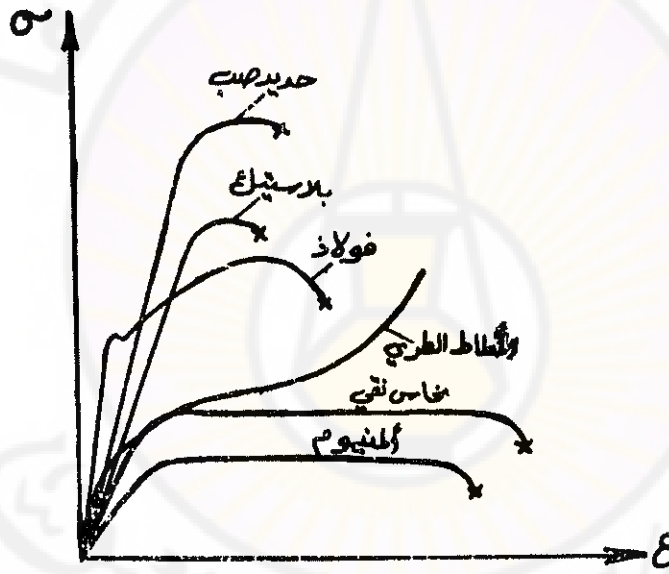
القياس المستعملة في الوقت الحاضر ليس بالأمر السهل وغالباً ما يكون غير ممكن، لذلك فقد اصطلح على أن يُعد حد المرونة للمادة هو ذلك الاجهاد الذي يترك فيها بعد التحميل انفعالاً لدناً مقداره 0.02 أو 0.002 ، وتحديد هذا الاجهاد سهل "إلى حدٍ ما حيث يمكن الحصول على قيمته هندسياً (انظر الشكل ٨ - ٩) وذلك بتحصيل العينة بقوة أو بالأحرى باجهاد ما (σ_1) وقياس الانفعال الناتج ϵ_1 ثم إزالة التحميل وقياس الانفعال من جديد فنحصل على الانفعال اللدن المتبقي عن هذا الاجهاد ϵ_{lp} ونأخذ هذه النقاط على مخطط الشد المرسوم مسبقاً لهذه المادة ثم نصل بين النقطة التابعة لقيمة (σ_1) من المنحني والنقطة المشيرة الى قيمة (ϵ_{lp}) على الخط الأفقي، فلو أخذنا الآن على الخط الأفقي نقطة تبعد عن المركز (O) بسدّار يتناسب مع 0.02 أو 0.002 وأخذنا منها موازياً للمستقيم السابق فإن هذا الموازي سوف يقطع المنحني في نقطة مسقطها على المحور الشاقولي يعطينا قيمة الاجهاد المطلوب تحديده . وتبّع طريقة مماثلة



الشكل (٨ - ٩) : مخطط الحصول على أعلى قيم لحد المرونة الذي يترك في العينة انفعالاً معيناً .

لتحديد حد الانسياب عندما لا يكون واضحاً في منحنيات الشد لبعض المواد ، حيث اصطلح أيضاً أن يعد الإجهاد الذي يترك انفعالاً لدناً قدره 0.2σ هو حد الانسياب لمثل هذه المواد .

يوجد بصفة عامة ثلاثة أشكال من منحنيات الاجهاد - الانفعال . فأحد هذه المنحنيات يُبيّن أن مرحلة اللدونة عند بعض المواد (مثل النحاس والألمنيوم والفولاذ) تكون واسعة ، وتسمى هذه المواد المواد المطيلية (انظر الشكل ٨ - ١٠) فيما يُبين المنحني الآخر أن مرحلة اللدونة صغيرة إذا ما قورنت بتلك في المواد المطيلية ،



الشكل (٨ - ١٠) : منحنيات الاجهاد - الانفعال لمواد مختلفة

وهذا واضح من الشكل (٨ - ١٠) بالنسبة لحديد الصب والبلاستيك ، إذ تسمى هذه المواد المواد الهشة (القصيفة) . ويختلف المنحني الثالث اختلافاً كبيراً (من حيث نوعية العلاقة بين الاجهاد والانفعال) عن المنحنيين السابقين (مثال على ذلك المطاط الطري - انظر الشكل ٨ - ١٠) .

٨ - ١ - ٥ - القيم المستنتجة من اختبار الشد :

إن القيم المستنتجة من اختبار عينة واحدة فقط على الشد كثيرة ومتنوعة وتصلح في حسابات تصميمية عدة . فلقد ذكرنا آنفاً أن مخطط الشد لبعض المعادن يبين حد المرونة وحد الاجهاد الاعظمي وحد الانكسار للمعدن ، وسوف نورد فيما يلي القيم الأخرى التي تنتج من الاختبار الواحد آخذين بعين الاعتبار الفرضية المعروفة وهي أن حجم العينة يبقى ثابتاً أثناء التحميل ($A_0 L_0 = A_i L_i$)

حيث : L_0 ، L_i - طول العينة الأصلي وبعد التحميل بالترتيب .

A_0 ، A_i - مساحة مقطع العينة قبل الانفعال وبعده .

١ - الانفعال العسادي : وهو نسبة الاستطالة إلى الطول الأصلي للعينة :

$$\epsilon = \frac{dL}{L_0} \Rightarrow \epsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} = \frac{A_0}{A_i} - 1 \quad (8.10)$$

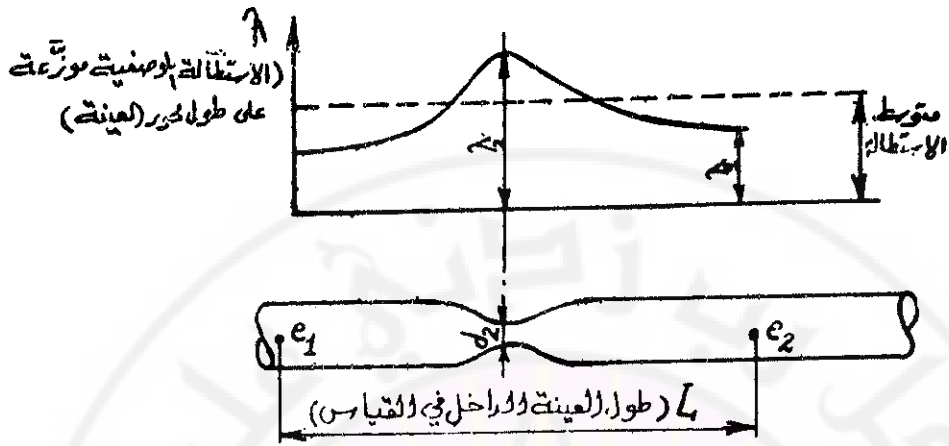
٢ - الانفعال الحقيقي : وهو نسبة الاستطالة إلى الطول اللحظي (أو الآني)

للعينة :

$$\lambda = \frac{dL}{L_i} \Rightarrow \lambda = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L_i} = \ln \frac{L_i}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A_i} = 2 \ln \frac{d_0}{d_i} \quad (8.11)$$

٣ - الانفعال الموضعي : إذا قسّم طول العينة إلى أجزاء صغيرة وقيس

الانفعال في كل من هذه الأجزاء على حدة سُمي عندئذ الانفعال الموضعي . والانفعال الموضعي هذا يكون واحداً على طول محور العينة إذا كان التغير فيها متجانساً ، أما في



الشكل (٨ - ١١) : توزيع الانفعال على طول محور العينة أثناء اختبار الشد

حال عدم التجانس فسوف يتغير الانفعال الموضعي من جزء إلى آخر على طول محور العينة (انظر الشكل ٨ - ١١) .

٤- التقلص العادي : يمكن أن يعبر عن انفعال العينة بالتقلص النوعي للمقطع بدلاً من الاستطالة النوعية . والتقلص العادي هو نسبة تغير مساحة مقطع العينة الى مساحة المقطع الأصلية :

$$\Psi = \int_0^{\Psi} d\Psi = - \int_{A_0}^{A_i} \frac{dA}{A_0} = \frac{A_0 - A_i}{A_0} \quad (2/8.11)$$

٥- التقلص الحقيقي : وهو نسبة تغير مساحة مقطع العينة الى مساحة المقطع اللحظية :

$$\Psi' = \int_0^{\Psi'} d\Psi' = - \int_{A_0}^{A_i} \frac{dA}{A} = \ln \frac{A_0}{A_i} \quad (8.12)$$

ويمكننا من العلاقات آتية الذكر أن نستنتج العلاقة بين هذه القيم. فالانفعال الحقيقي مثلاً يمكن أن يكتب بأحد الاشكال الثلاثة التالية :

$$\lambda = \Psi' ; \lambda = \ln(1 + r) ; \lambda = \ln \frac{1}{1 - \Psi} \quad (8.13)$$

بينما توجد العلاقة التالية بين الانفعال والتقلص العاديين :

$$\epsilon = \frac{\Psi}{1 - \Psi} \quad (8.14)$$

٦- معادل بواسون (Poisson) : وهو النسبة بين الانفعال العرضي والانفعال الطولي (أي النسبة بين التقلص العادي والانفعال العادي) وصن مجال الانفعال الذي يتم فيه استخدام قانون هوك :

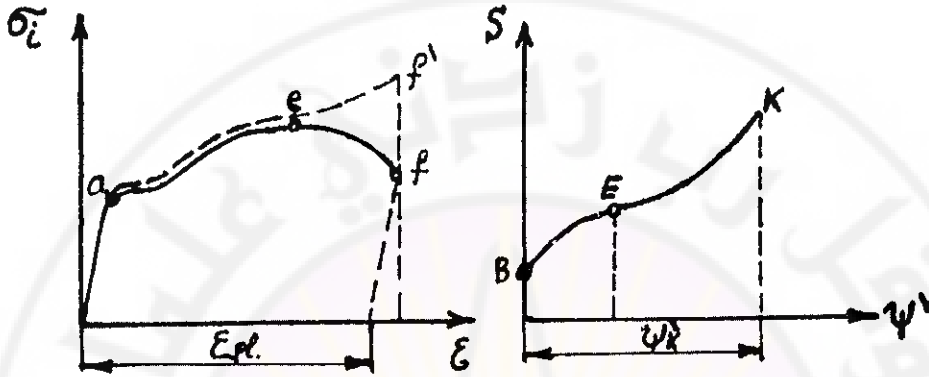
$$\mu = - \frac{\Psi}{r} \quad (8.15)$$

وتختلف قيم معامل بواسون من مادة إلى أخرى ، فمثلاً للفلواذ ($\mu \approx 0,3$) وللنحاس والألمنيوم ($\mu = 0,32 \div 0,36$) وللمطاط ($\mu \approx 0,5$) وللبيتون ($\mu = 0,16 \div 0,18$) .

٧- الاجهاد الحقيقي : يمكننا أن نحصل على مخطط أكثر دقة ووضوحاً من المخطط المرسوم في الشكل (٨ - ١٢) ، حيث يُبيّن هذا المخطط الجديد حقيقة ازدياد قيم الاجهادات والانفعالات على طول محور العينة بدءاً من التحميل وحتى الانكسار وبخاصة في منطقة الاختناق .

وباستخدام العلاقات السابقة يمكننا أن نوجد الاجهاد الحقيقي بالعلاقة التالية :

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_i} = \frac{P_i / A_0}{A_i / A_0} = \frac{\sigma}{A_i / A_0} = \sigma \left(\frac{A_0}{A_i} \right) = \sigma (1 + \epsilon) \quad (8.16)$$



الشكل (٨ - ١٢) :

- (a) علاقة الاجهاد العادي والاجهاد الحقيقي بالانفعال .
(b) علاقة الاجهاد الحقيقي بالتقلص الحقيقي .

ويُبيّن الشكل (٨ - ١٢ a) مخطط الاجهاد العادي والحقيقي للفولاذ (الاجهاد الحقيقي هو الخط المتقطع على الشكل) وعلاقتهما بالانفعال . بينما يُبين الشكل (٨ - ١٢ b) مخطط الاجهاد الحقيقي للفولاذ وعلاقته بالتقلص الحقيقي حيث $(S = \frac{P_i}{F_i})$ ، وتُبيّن النقطة B في هذا الشكل بداية تشكل الانفعالات اللدنة المتبقية (أي حد الانسياب) ، بينما تُبين النقطة E حد الاجهاد الأعظمي الحقيقي والنقطة K حد الانكسار .

٨ - العمل الناتج عن انفعال العينة أثناء الاختبار : إن العمل الكلي اللازم لكسر العينة يتحدد بالعلاقة التالية :

$$W_{all} = \int_{L_0}^{L_c} F dL \quad (8.17)$$

وأما العمل النوعي فهو نصيب وحدة الحجم من العينة من العمل الكلي :

$$W = \int_{L_0}^{L_c} \frac{F dL}{V_0} \quad (8.18)$$

وبما أن $(V_0 = A_0 L_0 = A_i L_i)$ فإن معادلة العمل النوعي يمكن أن تكتب بأحد الشكلين التاليين :

$$W = \int_{L_0}^{L_c} \frac{F dL}{A_0 L_0} = \int_0^{\epsilon_c} \sigma d\epsilon \quad (8.19)$$

أو :

$$W = \int_{L_0}^{L_c} \frac{F dL}{A_i L_i} = \int_0^{\lambda_c} \sigma' d\lambda \quad (8.20)$$

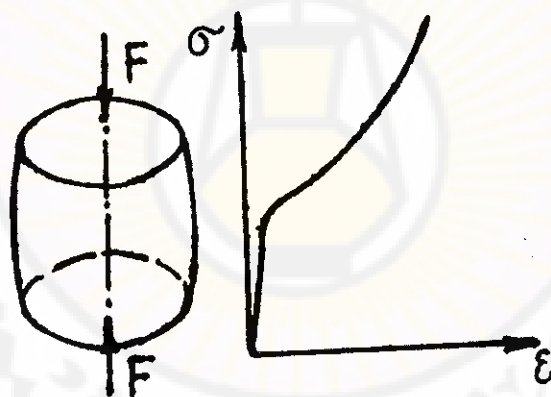
٨ - ٢ - اختبار الضغط :

على الرغم من بساطة اجراء اختبار الضغط إلا أنه نادراً ما يستخدم والسبب في ذلك يعود إلى مايلي :

إن قيم معامل يونغ وحد المرونة وحد الانسياب للمعادن اللدنة تكون تقريباً متساوية في حالة الشد أو في حالة الضغط ، وأما حد الانكسار عند

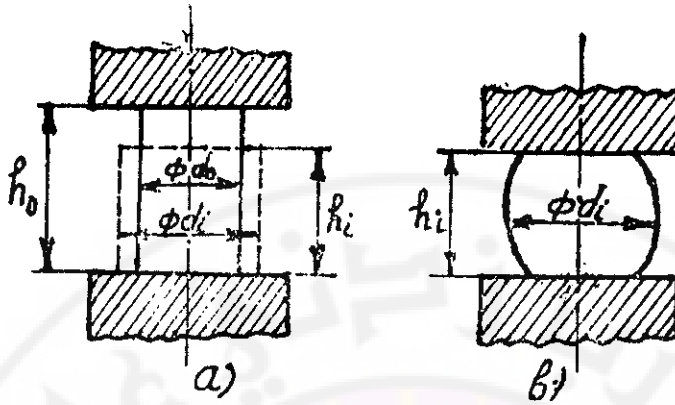
ضغط المعادن اللدنة فإنه لا يمكن الحصول عليه ذلك لأن عينة الاختبار لا تنكسر وإنما تتحول العينة الاسطوانية الشكل مثلاً إلى قرص وتبقى قوة الضغط بزيادة مستمر (انظر الشكل ٨ - ١٣) ، ولهذا فإن بعض الوحدات المماثلة للانفعال النسبي والتقلص النسبي عند انكسار العينة على الشد لا يمكن الحصول عليها في حالة الاختبار على الضغط .

إن المواد التي تُختبر على الضغط هي بصفة عامة مواد هشّة وهي عادةً تقاوم الضغط أكثر من الشد ، وتستخدم هذه المواد في إعداد العناصر الإنشائية التي تعمل على الضغط ، فعند تصميم هذه العناصر لابد من معرفة بعض الوحدات المستتجة من اختبارات الضغط لعينات اختبار مصنوعة من مواد هذه العناصر نفسها .



الشكل (٨ - ١٣) : منحنى الاجهاد - الانفعال في اختبار الضغط .

يُجرى اختبار الضغط على آلات اختبار خاصة أو على الآلات الهيدروليكية المستخدمة في اختبارات الشد كالمبينة في الشكل (٨ - ٢) حيث توضع عينة الاختبار على الوجه العلوي A_2 للرأس المتحرك T_1 ، وعند التحميل تنضغط



الشكل (٨ - ١٤) : تغير ابعاد العينة في اختبار الضغط

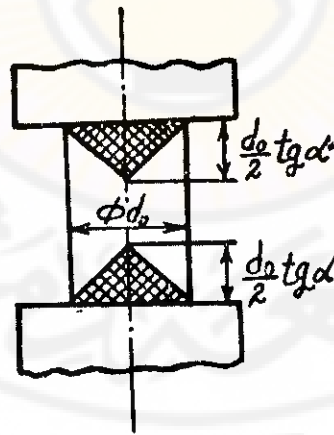
العينة بين الرأس T_1 ورأس الضغط الثابت في جسم الآلة A_1 . فاذا ضغطت عينة مصنوعة من الفولاذ الكربوني منخفض نسبة الكربون فانه نظرياً سوف ينقص ارتفاع العينة من h_0 إلى h_i ويزداد قطرها من d_0 إلى d_i (انظر الشكل ٨ - ١٤) ولكن عملياً فان العينة لا تستطيع أن تغير شكلها بشكل حر لأن تلامس سطحها العلوي والسفلي مع وجهي الرأسين الضاغطين سوف يعيق عملية تغير الشكل أو الانفعال في هذين السطحين والأجزاء القريبة منهما ، بينما يكون الانفعال أعظمياً عند المقطع الواقع في منتصف ارتفاع العينة ، وهكذا فان الانفعال في تجربة الضغط لن يكون متجانساً على الارتفاع كاملاً ، خاصة في العينات الندنة في حين أن الانفعال كان تقريباً متجانساً في تجربة الشد حتى بداية ظهور الاختناق في مقطع العينة .

٨ - ٢ - ١ اختيار العينات في اختبار الضغط :

يتحدد شكل عينة الضغط وأبعادها تبعاً لنوع المادة المراد اختبارها واستطاعة الآلية بالإضافة إلى الهدف من اجراء الاختبار . ويفضل أن تكون العينة ذات شكل اسطواني وذلك لتأمين انطباق محورها على محور التحميل ولتنظيم توزيع

الاجهادات في مقاطع العينة قدر الامكان أثناء التحميل ، أما ارتفاع العينة فيجب أن تقع قيمه ضمن مجال معين ومحدود وذلك للسبب التالي :

إن تغير الشكل الناتج في حال الشد والضغط وسواءً أكان استطالة أم تقلصاً ماهو إلا نتيجة لانزلاق المستويات البلورية بعضها على بعض ، والانزلاق يتم عادةً في المستويات التي تكون فيها اجهادات الانزلاق (القص) أعظمية - أي المستويات التي تسيل على اتجاه القوة المؤثرة بزاوية قدرها 45° . لهذا ونتيجة للاحتكاك بين سطحي العينة ورؤوس التحميل فسوف يتشكل في العينة عند كلٍ من السطحين العلوي والسفلي مخروط خامل لا يظهر فيه أي انفعال، قاعدته هي سطح العينة ورأسه واقع على محور العينة ، زاويته الرأسية 90° أي أن ارتفاعه يساوي $d_0/2$ (انظر الشكل ٨ - ١٥) . لهذا يجب أن لا يقل طول العينة عن d_0 كيلا يتلامس المخروطان الخاملان كما أنه يجب ألا يكون هذا الطول كبيراً جداً كيلا تظهر في العينة اجهادات جانبية تؤثر في نتائج التجربة، وغالباً ما يختار طول العينة بحيث يكون $(d_0 < h_0 < 3 d_0)$.



الشكل (٨ - ١٥) : المخروط الخامل في العينة أثناء اختبارها على الضغط .

٨-٢-٢ - منحنى الاجهاد - الانفعال في اختبار الضغط :

يسكن أن يتم رسم منحنى القوة - الاستطالة في اختبار الضغط (كسا في اختبار الشد) أثناء إجراء الاختبار على ورقة ميليمترية ملفوفة على اسطوانة .
يؤخذ أكبر عدد ممكن من النقاط على المنحنى الناتج بحيث توجد لكل نقطة الإجهاد العادي (الهندسي) σ والانفعال المقابل لهذا الاجهاد . وبهذا الشكل نحصل على منحنى الإجهاد - الانفعال .

يزداد مقطع العينة المختبرة باستمرار أثناء إجراء اختبار الضغط في حين يتناقص طولها (بعكس اختبار الشد) والوحدات المقيسة هنا هي الوحدات المقيسة نفسها في اختبار الشد ، فالانفعال العادي يمكن أن يكتب بالمعادلة التالية :

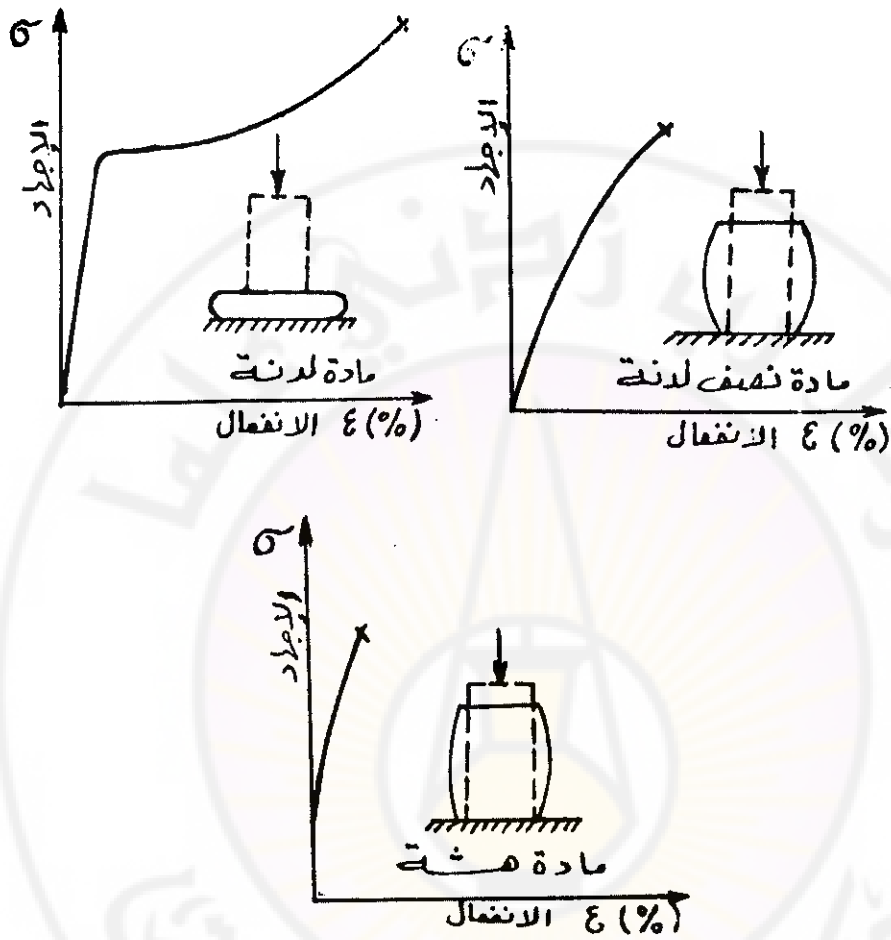
$$\epsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \quad (8.21)$$

وحسب فرضية ثبات الحجم يصبح الانفعال العادي :

$$r = 1 - \frac{h_1}{h_0} = 1 - \frac{A_0}{A_1} \quad (8.22)$$

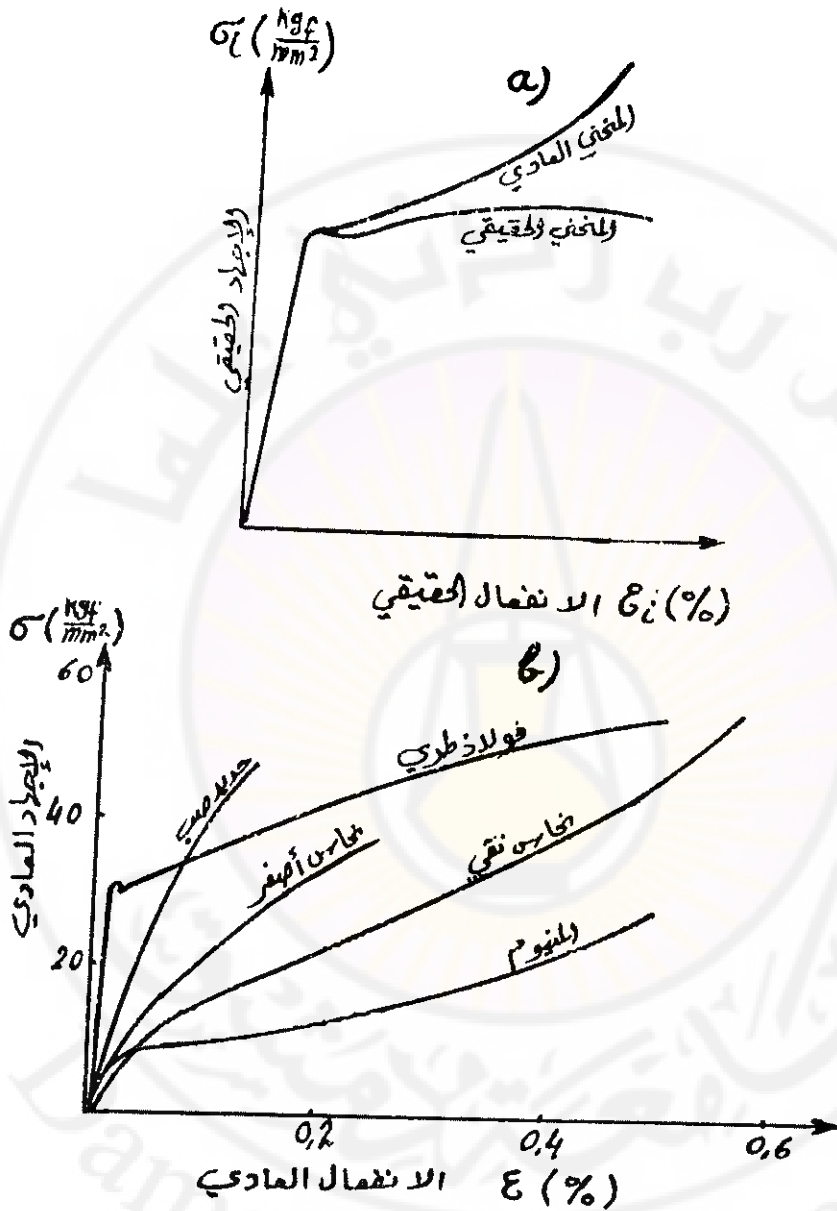
يتعلق شكل منحنى الضغط الناتج بنوعية المادة المختبرة (هشة أو نصف لدنة أو لدنة) ، ويبيّن الشكل (٨ - ١٦) اختلاف شكل منحنى الضغط باختلاف نوع المادة المختبرة .

ويجب أن ننوه هنا إلى أنه إذا كانت المادة المختبرة على الضغط هشة أو نصف لدنة فإن منحنى الاجهاد العادي - الانفعال العادي يسكن أن يعطي المعلومات التقريبية عن حالة هذه المادة أثناء اختبار الضغط ، أما إذا كانت المادة لدنة فإن هذا



الشكل (٨ - ١٦) : تغير شكل منحنى الاجهاد - الانفعال بتغير نوع المادة المختبرة على الضغط .

المنحني لن يعد مقبولا ويجب استبدال منحنى الاجهاد الحقيقي - الانفعال الحقيقي به (انظر الشكل ٨ - ١٧) ذلك لأن تغير مقطع العينة لن يكون واحداً في أجزائها كافة وبالتالي فان قيسة سوف تختلف من نقطة إلى أخرى على طول محورها . لذلك يتم حساب كل من قيم الاجهاد والانفعال اللحظيين وفق المعادلتين التاليتين :



الشكل (٨ - ١٧) :

- (a) منحنى الاجهاد الحقيقي - الانفعال الحقيقي .
 (b) منحنى الاجهاد المادي - الانفعال المادي لبعض المعادن والخلائط المعدنية .

$$\epsilon_i = \ln \frac{A}{A_0} = \ln (1 - \epsilon) \quad (8.23)$$

$$\sigma_i = \frac{P}{A} = \sigma (1 - \epsilon) \quad (8.24)$$

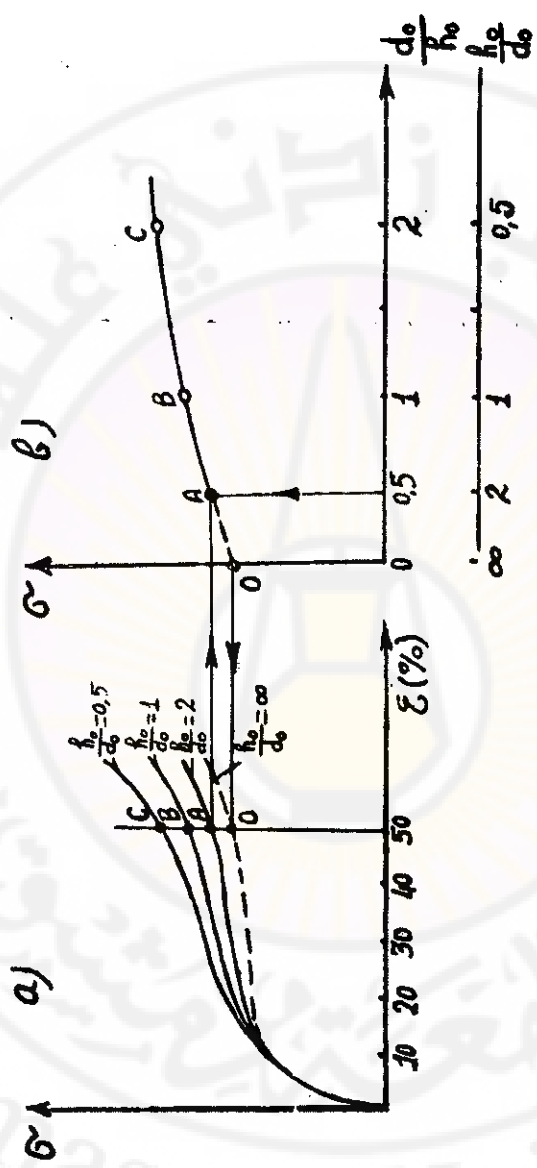
ومع كل هذا فإن منحنيات الضغط المتوافرة في المراجع للمعادن والخلائط المعدنية هي منحنيات من النوع اجهاد عادي - انفعال عادي (انظر الشكل ٨ - ١٧ ب) •

٨ - ٢ - ٢ - منحني الضغط للعينة اللانهاية الطول :

نظراً لعدم تجانس الانفعال فإن قيمة الاجهاد (سواء العادي أو الحقيقي) المحسوب من العلاقات الواردة في البند السابق سوف تتغير بتغير مقياس العينة وبالضبط بتغير نسبة طول العينة إلى قطرها ($\frac{h_0}{d_0}$) • ولقد بينا آنفاً أنه يجب أن لا تكون النسبة ($\frac{h_0}{d_0} \leq 1$) حتى لا يتلامس المخروطان الخاملان (انظر الشكل ٨ - ١٥) ، كما أنه يجب ألا تزيد هذه النسبة عن الرقم 3 بكثير حتى لا تظهر في العينة إجهادات جانبية تؤثر في نتائج التجربة (أي حتى لا يحصل انبعاج في العينة نتيجة لوجود عزم انحناء بجانب حمل الضغط) •

إن السبب في تصور العينة الطويلة جداً (أي اللانهاية في الطول) والبحث عن منحني الضغط لهذه العينة هو محاولة التخلص من تأثير الاحتكاك الحاصل بين نهايتي العينة والرؤوس الضاغطة في نتائج القياس •

يحتوي المخطط المبين على الشكل (٨ - ١٨ أ) على عددين من منحنيات الضغط لعينات مختلفة المقاييس ولكنها معدة من معدن واحد ، فبالاستعانة بهذه المنحنيات يمكن أن نرسم بشكل تقريبي منحني الضغط النظري للعينة اللانهاية



الشكل (٨ - ١٨) : استنتاج منحنى الضغط للعينة الانتهائية الطول .

(أي التي تحقق مقاييسها النسبة : $\frac{h_0}{d_n} = \infty$) ، ويتم ذلك على الشكل التالي :

نختار على المحور الأفقي قيمة معينة للانفعال النسبي (50% مثلاً) ،
ثم نرفع من النقطة الدالة على هذه القيمة خطاً شاقولياً فيقطع هذا المخطط منحنيات
الضغط في نقاط تعطينا كل منها قيمة الاجهاد الذي يسبب في العينة التابع لها
المنحني انفعالاً قدره 50% . فاذا قمنا بنقل قيمة هذه الاجهادات إلى مخطط
بياني آخر أخذت فيه قيمة الاجهاد بتابعية النسبة $(\frac{d_0}{h_0})$ فاننا نحصل على
المنحني المبين على الشكل (٨ - ١٨ b) ، وبتمديد هذا المنحني حتى يقطع
المحور الشاقولي نحصل على قيمة الاجهاد الذي يسبب الانفعال نفسه في العينة
اللانهاية في الطول ، وبالتالي يمكننا أن نقوم برسم منحني ضغط هذه العينة
بشكل تقريبي (انظر المنحني المتقطع على الشكل ٨ - ١٨ b) .

٨ - ٢ - اختبار الانحناء :

لا يعني اختبار الانحناء الستاتيكي دراسة اجهادات الشد والضغط المؤثرة معاً
في المقاطع العرضية لعنصر مامن إنشاء فقط ، وإنما هناك مجموعة من الأسباب التي
تدعو لاجراء اختبار الانحناء ، أهمها :

١ - إن الانفعال الذي يحدثه الانحناء في عينة الاختبار يكون كبيراً بالمقارنة
مع الانفعال الذي يحدثه الشد أو الضغط ، لهذا يعد هذا الاختبار من أفضل
الاختبارات في تحديد خواص المرونة بسهولة ودقة أكبر من اختبار الشد أو
الضغط ، ولا يلزم في هذه الحالة تطبيق قوى كبيرة للحصول على انفعالات كبيرة ،
إذ أن سهم الانحناء يكون كبيراً عندما تكون القوى المطبقة صغيرة وعينات
الاختبار طويلة ، ولهذا يعد هذا الاختبار من الاختبارات الأساسية للمواد الهشة

مثل حديد الصب حيث يسهل بهذا الاختبار تعيين بعض الخواص الميكانيكية لهذه المواد والتي من الصعب تعيينها باختبار الشد .

٢ - يمكن تدوين العلاقة بين الحبل المطبق وسهم الانحناء بهدف دراسة خواص المرونة واللدونة للمادة المختبرة في منحني مشابه لمنحني الاجهاد - الانفعال في اختبارات الشد والضغط .

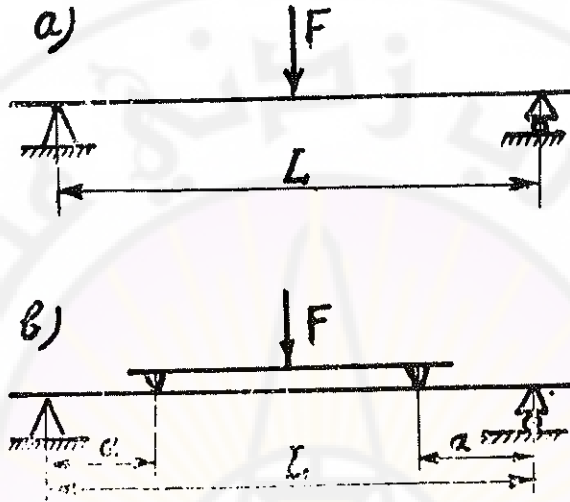
٣ - إن أغلب العناصر لا تتعرض إلى اجهادات شد أو ضغط أو قص بمفردها . وإنما يمكن أن تتعرض إلى مجموعة مركبة من هذه الاجهادات . وبما أنه يمكننا باجراء اختبار الانحناء المناسب أن نعرض عينة الاختبار إلى مجموعة الاجهادات آتفة الذكر في آن واحد فاننا نكون بهذا قد اقتربنا من ظروف التحميل الحقيقية التي يتعرض لها عنصر الإنشاء .

٤ - على الرغم من استخدام عينات نظامية لاختبار الانحناء في أغلب الاحيان إلا أن هذه العينات لا تحتاج إلى تحضير مسبق يتطلب الجهد والوقت كما في الاختبارات الأخرى ، كما أن إجراء الاختبار على الانحناء لا يلزمه تصميم آلات اختبار خاصة واعدادها وإنما يمكن أن يتم على آلة الشد العامة نفسها (انظر الشكل ٨ - ٢) وذلك بعد تجهيز وجهي الضغط بالرؤوس المناسبة ، بحيث يجوز الوجه السفلي المتحرك بالرأس الحامل لنقطتي الاستناد والوجه العلوي بالرأس الحامل لنقاط تأثير القوة .

٨ - ٣ - ١ - إجراء الاختبار والوحدات المستنتجة :

يتم وضع عينة الاختبار أفقياً على نقطتي استناد (تكون عادة نقاط الارتكاز اسطوانية الشكل) بحيث تضمن توازن العينة أثناء الاختبار وعدم انزلاقها ، ثم تطبق عليها قوة التحميل من الأعلى عبر رأس اسطوانتي الشكل أيضاً وذلك كي تضمن تركيز الإجهادات في نقاط التماس بين رأس التحميل وسطح العينة . ويمكن

أن يكون تأثير قوة التحميل في نقطة واحدة عند منتصف البعد بين نقطتي الاستناد (انظر الشكل ٨ - ١٩ a) وفي نقطتين متساويتي البعد عن النقطتين المذكورتين (انظر الشكل ٨ - ١٩ b) .

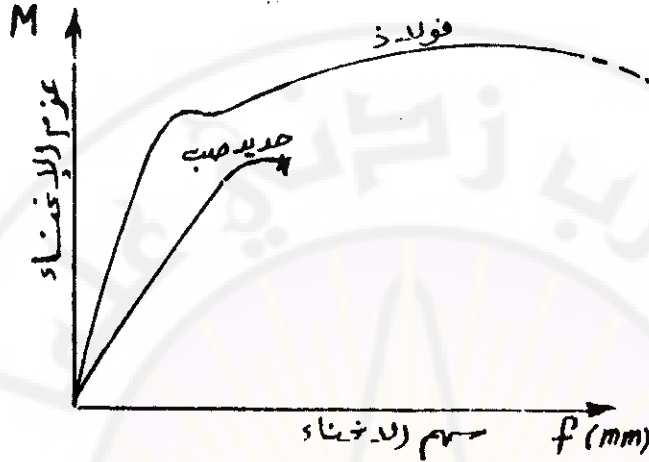


الشكل (٨ - ١٩) : رسم تخطيطي يبين كيفية تحميل العينة عند إجراء اختبار الانحناء الستاتيكي .

إن الوحدات التي تقاس أثناء اختبار الانحناء الستاتيكي هي القوة F (أو عزم الانحناء M) ومقدار الانحناء الأعظمي عند منتصف طول العينة وترسم في مخطط بياني مماثل لمخطط الشد فنحصل على المخطط الميّن على الشكل (٨ - ٢٠) والذي يُسمى منحنى الانحناء . فإذا كانت العينة لدنة فأننا نلاحظ من الشكل أن الانفعال اللدن يستمر لفترة طويلة ، والسبب في ذلك هو عدم تشكل أي اختناق أثناء الانحناء ، ولا تبدأ القوة بالتناقص إلا عندما تبدأ العينة بالانكسار .

إن اختبار الانحناء حتى الكسر يتم فقط على المواد الهشة ، أما المواد اللدنة فمن الصعب كسرها بهذه الطريقة وتختبر غالباً ضمن مجال المرونة خاصة وأن العلاقة

بين الاجهاد والانتقال (أو سهم الانحناء) ضمن هذا المجال هي علاقة خطية حسب نظرية هوك .

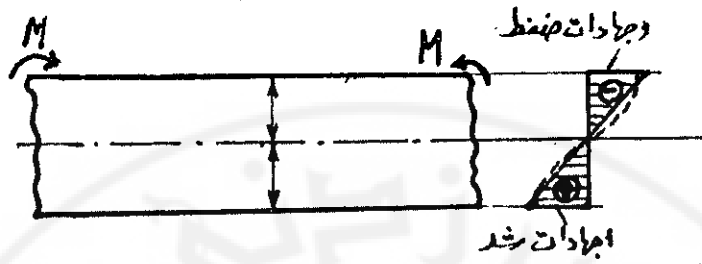


الشكل (٨ - ٢٠) : منحنيات الانحناء الستاتيكي لكل من الفولاذ وحديد الصب .

يكون عزم الانحناء أعظمياً عند نقطة تأثير القوة ، أي أن :

$$M_{\max} = \frac{F \cdot L}{4} \quad (8.25)$$

أما الاجهادات فهي إجهادات ضغط في النصف العلوي من مقطع العينة وإجهادات شد في النصف السفلي ، أما الخط الفاصل بين مجالي الضغط والشد فيسمى الخط المحايد (انظر الشكل ٨ - ٢١) . ويجب أن ننوه إلى أنه إذا كان اختبار الانحناء يجري ضمن مجال مرونة العينة فإن الخط المحايد ينطبق على محور العينة ، ويكون الاجهاد بصفة عامة معدوماً عند هذا الخط ويزداد باتجاه السطحين حيث يصبح أعظمياً عند كل منهما . ويمكن إيجاد قيمة الاجهاد الاعظمي (سواءً إجهاد الشد أو الضغط) عند أيٍّ من السطحين بالعلاقة التالية :



الشكل (٨ - ٢١) : توزيع إجهادات الشد والضغط (التقريبية والحقيقية) على كامل مقطع عينة الاختبار .

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \quad (8.26)$$

حيث : W - عزم المقاومة المحوري للمقطع ، ويساوي في حال المقطع الدائري $\frac{\pi d^3}{32}$ (حيث : d - قطر المقطع) وفي حال المقطع المستطيل $\frac{b a^3}{6}$ (حيث : b - طول المستطيل و a - عرضه) .

فاذا افترضنا أن مقطع العينة المختبرة في حالتنا هذه دائري وأخذنا بعين الاعتبار قيمة العزم الأعظمي من العلاقة (8.26) فإن الاجهاد الأعظمي يصبح مساوياً :

$$\sigma_{\max} = \frac{F \cdot L / 4}{\pi d^3 / 32} = \frac{8 F L}{\pi d^3} \quad (8.27)$$

أما سهم الانحناء الأعظمي عند نقطة تأثير القوة (أي في منتصف العينة) فتحدده العلاقة التالية :

$$f_{\max} = \frac{1}{48} \cdot \frac{F L^3}{E \cdot I} \quad (8.28)$$

حيث : 1 - عزم العطالة المحوري للمقطع ، ويساوي في حال المقطع

الدائري ($I = W \cdot \frac{d}{2}$) وفي حال المقطع المستطيل ($I = W \cdot \frac{a}{2}$) .

ولهذا يمكننا كتابة العلاقة (8.28) اذا تابعنا افتراض مقطع العينة دائرياً على الشكل :

$$f_{\max} = \frac{1}{12} \cdot \frac{FL/4}{W} \cdot \frac{L^2}{E \cdot \frac{d}{2}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sigma_{\max} \cdot L^2}{E d} \quad (8.29)$$

٨ - ٣ - ٢ - المقارنة بين الوحدات المستنتجة في كل من اختبري الشد والانحناء :

يتمتع الاجهاد الناتج في مقطع العينة (سواء عند اختبارها على الانحناء أو على الشد) بالقيمة نفسها وذلك عندما يتم كلا الاختبارين ضمن مجال المرونة ويكون التحميل بالقوة نفسها في كلتا الحالتين . وبما أن إيجاد اجهاد المرونة في حالة الشد يتم باستخدام قانون هوك :

$$\sigma_{\max} = E \epsilon = E \frac{\Delta L}{L} \quad (8.30)$$

ولهذا فإن الاستطالة في حالة الشد تساوي :

$$\Delta L = \frac{\sigma_{\max} \cdot L}{E} \quad (8.31)$$

فاذا قارنا الاستطالة الناتجة لدينا من هذه العلاقة مع سهم الانحناء الذي يمكن أن ينتج عن تحميل العينة نفسها وبالقوة نفسها فالتا نحصل على النسبة التالية:

$$\frac{f_{\max}}{\Delta L} = \frac{L}{6 d} \quad (8.32)$$

وبما أن عينة اختبار الانحناء غالباً ما يكون طولها الفعال ٦٠٠ مم وقطرها ٣٠ مم فإن :

$$\frac{f_{\max}}{\Delta L} = \frac{600}{6 \times 30} = 3,33 \quad (8.33)$$

أي الانتقال في حالة الانحناء يكون أكبر من الانتقال في حالة الشد للعينة نفسها وفي الشروط نفسها بمقدار ٣,٣٣ ضعفاً . وإذا أخذنا بعين الاعتبار أن عينة الشد غالباً ما يكون طولها ١٠٠ مم أو أقل فإن المقدار السابق يصبح ٢٠ ضعفاً أو أكثر ، وهكذا فإن قياس سهم الانحناء أسهل وأكثر دقة من قياس الانفعال في تجربة الشد . لهذا كثيراً ما يُستعمل اختبار الانحناء في قياس الانفعالات في المواد الهشة ومن أجل حساب عامل المرونة لمواد الانشاءات المختلفة وذلك بقياس القوة وسهم الانحناء ثم حساب عامل المرونة من العلاقة (8.31) على النحو التالي :

$$E = \frac{\sigma L^2}{6 f_{\max} \cdot d} \quad (8.34)$$

وفي كثير من الأحيان يتم إيجاد قابلية العينة للانحناء ψ وذلك من خلال النسبة بين سهم الانحناء الأعظمي الناتج عند كسر العينة إلى طولها الفعال :

$$\psi = \frac{f_{\max}}{L} \times 100 \quad (8.35)$$

كما يمكن إيجاد معامل الانحناء الستاتيكي من خلال النسبة بين إجهاد الكسر في اختبار الانحناء إلى إجهاد الكسر في اختبار الشد :

$$C_d = \frac{\sigma_d}{\sigma_t} \quad (8.36)$$

ويجب أن ننوه هنا إلى أن اختبار الانحناء يقتصر عادةً على الاختبار أو التحميل حتى حد الانسياب للمادة المختبرة وذلك لأن توزيع الإجهاد على المقطع بعد هذا الحد لا يبقى خطياً منتظماً (انظر الشكل ٨ - ٢١)، كما أن الخط المحايد ينزاح عن محور العينة .

٨ - ٤ - اختبار الفتل :

هناك كثير من عناصر الآلات وبخاصة العناصر التي تقوم بنقل عزوم الدوران تتعرض لعزوم فتل ، لهذا تجرى اختبارات الفتل بغية معرفة مدى مقاومة عزوم الفتل عند المواد التي تصنع منها هذه العناصر من جهة واستنتاج بعض الخواص الميكانيكية التي تلزم في الحسابات التصميمية للعناصر التي تتعرض لمثل هذه العزوم .

ويجب أن نعلم أن الانفعال الناتج من الفتل سببه توفر أزواج من الاجهادات التي يتعامد مستوي تأثيرها مع محور عينة الاختبار . وكما تظهر التجارب فإن المقاطع العرضية عند الفتل تدور بالنسبة لبعضها بعضاً حول محور العينة ، لهذا فإن طول العينة المختبرة يبقى ثابتاً .

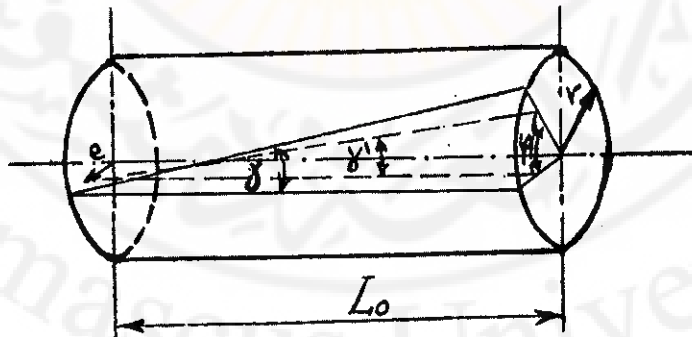
٨ - ٤ - ١ - اختيار العينات وإجراء الاختبار :

لا تخضع عينات اختبار الفتل الستاتيكي لمواصفات محددة وإنما يتم اختيار العينة طبقاً للهدف المطلوب من إجراء هذا الاختبار . فإذا كان الهدف هو الحصول على قيم لبعض الخواص الميكانيكية والتي يستفاد منها في الحسابات التصميمية فإن عينة الاختبار تكون اسطوانة مصمتة لها سطح خارجي ناعم ونهائتان يكون مقطعهما العرضي أكبر من المقطع العرضي للطول الفعلي للعينة وذلك بغية حصر

الكسر الناتج عن القتل في المقطع الفعلي وليس عند نهاية العينة • أما إذا كان الهدف هو التعرف على مدى مقاومة عنصر ما من آلة (سواء أكان مقطعه دائرياً أم غير دائري وسواء أكان هذا العنصر منتظماً على كامل طوله أم لم يكن كأن يحتوي على ثقب أو مسلك لخابور ... الخ) فإن الاختبار يجرى على هذا العنصر بشكله وأبعاده الطبيعيين وليس على عينات مصنوعة من هذا العنصر •

ولإجراء الاختبار تُثبت العينة بين فكي آلة الاختبار بحيث تُثبت إحدى نهايتي العينة في جسم الآلة بينما تُحمل النهاية الأخرى بعزم قتل ، وبنتيجة التحميل فإن كل مولد من مولدات سطح العينة والذي هو بالأساس مستقيم سوف ينقل حول محور الاسطوانة ليشكل خطاً لولياً (انظر الشكل ٨-٢٢) ، ويصبح هذا الخط مائلاً على وضعه الأصلي بزاوية مقدارها γ ، وإذا أخذنا مقطعين للعينة (انظر الشكل ٨-٢٢) وكان البعد بينهما L_0 فإن أحدهما سوف يدور بالنسبة للآخر بزاوية φ (تسمى زاوية القتل) ، حيث تكبر هذه الزاوية عند زيادة عزم القتل أو عند زيادة طول العينة أو عند زيادة كليهما معاً • ويساوي انفعال القتل ظل الزاوية γ ، حيث :

$$\gamma = \varphi \cdot \frac{r}{L_0} \quad (8.37)$$



الشكل (٨ - ٢٢) دوران مولدين من مولدات اسطوانة أثناء اختبارها على القتل.

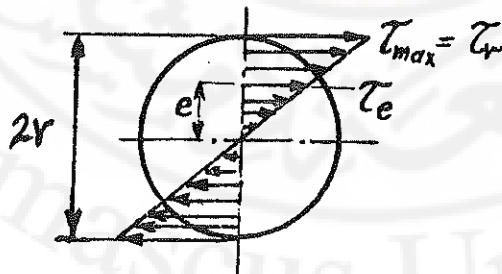
وإن مقدار الإجهاد في أي نقطة من جسم العينة تميزه زاوية ميل المولد المار بهذه النقطة على وضعه الاصلي قبل القتل ، وهذه الزاوية تتناسب طردياً مع بعد هذا المولد عن محور العينة كما يتضح ذلك من الشكل (٨ - ٢٢) ، أي أن:

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{\varphi \cdot \frac{e}{L_0}}{\varphi \cdot \frac{r}{L_0}} = \frac{e}{r} \quad (8.38)$$

٨ - ٤ - ٢ - الوحدات المقيسة والمستنتجة من اختبار القتل :

إن الوحدات التي تقاس خلال تجربة القتل هي عزم القتل M وزاوية القتل φ . ويتم قياس العزم بجهاز خاص يثبت على الآلة عند النهاية الثابتة للعينة ، أما الزاوية φ فتقاس بواسطة دائرة مدرجة من الصفر الى 90° ومؤشر يتحرك أمام هذه الدائرة ، وتثبت الدائرة حول العينة عند نهايتها الثابتة بينما تثبت قاعدة المؤشر على النهاية المتحركة لعينة الاختبار وتمتد نهايته فوق العينة لتكون أمام الصفر على الدائرة المدرجة وتدوير النهاية المتحركة للعينة يدور معها المؤشر ويشير مباشرة على الدائرة المذكورة الى زاوية الدوران φ .

وبما أن الوحدات المقيسة خلال الاختبار هي عزم القتل M وزاوية القتل φ ، فإن انفعال القتل γ يتم حسابه وفق العلاقة (8.37) . أما حساب



الشكل (٨ - ٢٣) : توزيع إجهاد القتل على قطر مقطع العينة

الاجهاد في مقطع عينة الاختبار فانه يتعلق بالاعتبارات التالية :

- ١- عند محور العينة (أي عندما تكون $r = 0$) فان الإجهاد يكون معدوماً ، بينما يكون هذا الإجهاد أعظمية عند سطح العينة (انظر الشكل ٨-٢٣) .
- ٢- إن تزايد الإجهاد في المقطع بين المحور والسطح هو تزايد خطي ضمن مجال مرونة العينة ، ولهذا فان قيمة الاجهاد على مسافة e من محور العينة يمكن كتابته بالشكل :

$$\frac{e}{r_{\max}} = \frac{e}{r} \Rightarrow r_e = r_{\max} \cdot \frac{e}{r} \quad (8.39)$$

- ٣- إن قيمة الاجهاد ضمن مجال المرونة تحسب عادةً بالعلاقة التالية :

$$r = \gamma \cdot G \quad (8.40)$$

حيث : G - عامل مرونة الفتل ، وقيمة هذا العامل في المعادن هي :

$$G = 0,38 E$$

ويمكن حساب قيمة الاجهاد من خلال عزم الفتل وبعد النقطة المراد حساب الإجهاد فيها عن محور العينة . فمثلاً في النقاط التي تبعد بمقدار e عن محور العينة يكون الاجهاد مساوياً :

$$r_e = \frac{M}{I_p} \cdot e = \frac{M}{W_p \cdot \frac{d}{2}} \cdot e \quad (8.41)$$

حيث : $d = 2r$

أما الإجهاد الأعظمي على السطح فتساوي قيمته :

$$r_{\max} = \frac{M}{I_p} \cdot \frac{d}{2} = \frac{M}{W_p} \quad (8.42)$$

حيث : I_p - عزم عطالة المقطع القطبية ، وقيسته في حال المقطع الدائري :

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \quad (8.43)$$

W_p - عزم المقاومة القطبي للمقطع وقيسته أيضاً في حال المقطع الدائري :

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16} \quad (8.44)$$

غالباً ما تكون الغاية من تجربة الفتل هي البحث عن قيمة G في مجال حد المرونة للعينة ، لهذا وبمقارنة العلاقاتين (8.40 و 8.42) وبعد الأخذ بعين الاعتبار العلاقة (8.44) نجد أن :

$$\tau = \gamma G = \frac{M}{W_p} = \frac{16 M}{\pi d^3} \quad (8.45)$$

ومن العلاقة (8.45) يتم إيجاد قيمة G .

وإذا كانت الغاية من تجربة الفتل معرفة قيمة زاوية الفتل φ ، عندها يمكن أن نكتب :

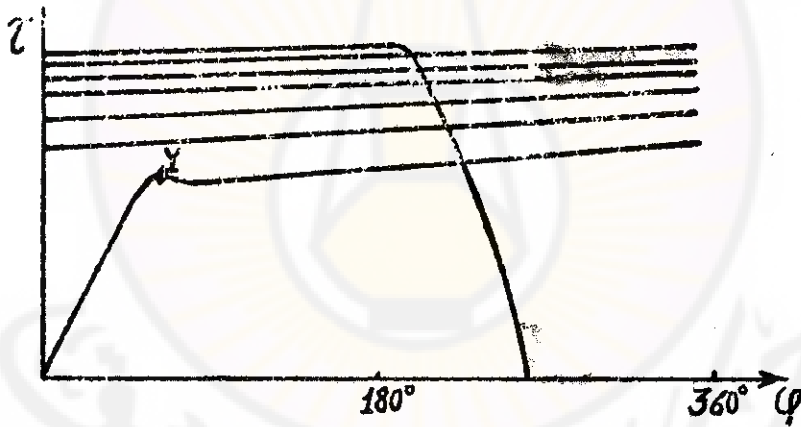
$$\tau = \gamma G = \frac{\varphi \cdot \frac{d}{2}}{L_0} G = \frac{16 M}{\pi d^3} \quad (8.45)$$

وعندئذ تصبح قيمة زاوية الفتل مساوية :

$$\varphi = \frac{32 M L_0}{\pi d^4 \cdot G} \quad (8.47)$$

إن اختبار الفتل يجري عادةً على المواد الهشة حتى الانكسار ، أما المواد

الدنة يمكنها باختبارها حتى حد الانسياب وذلك لأنه بعد هذا الحد يصبح توزيع الاجهاد في المقطع أكثر تعقيداً ، والقيم المقيسة أقل قيمة من الناحية العملية. أما في المعادن والخلائط المعدنية التي لا يكون لها حد انسياب واضح ، فيعد حد الانسياب هو $\sigma_{0.2}$ أو بالأحرى $\sigma_{0.1}$ ويرسم لتجربة الفتل مخطط مماثل لمخطط الشد حيث تؤخذ فيه M بتابعية φ أو τ بتابعية φ (انظر الشكل ٨ - ٢٤) ، إذ يُبيّن هذا الشكل منحنى الفتل لمادة لدنة (فولاذ طري) ويلاحظ من الشكل أنه حتى حد الانسياب يكون المنحنى على شكل مستقيم مائل وبعد ذلك يصبح أقل ميلاً وينتقص ميله باستمرار مقترّباً من الوضع الأفقي حتى الانكسار ، كما يلاحظ أن النهاية المحصلة للعينة تدور عدة دورات قبل أن يتم الكسر .



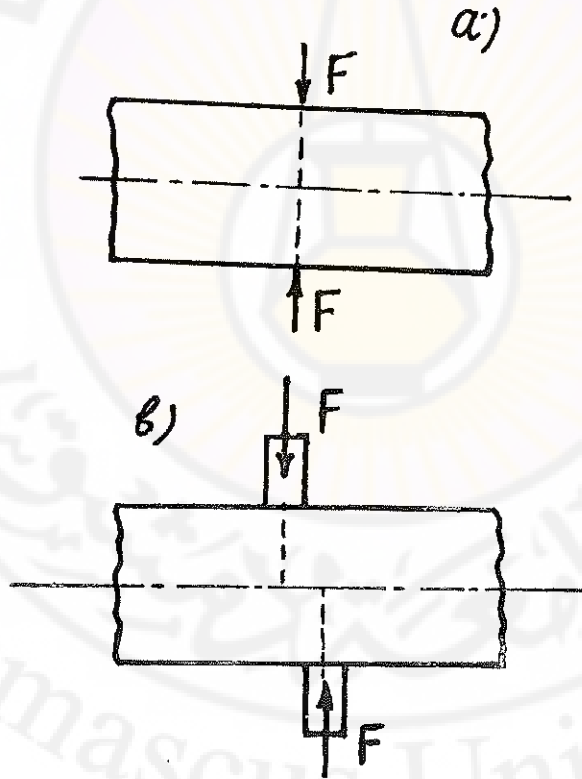
الشكل (٨ - ٢٤) : منحنى الفتل للفولاذ الطري

٨ - ٥ - اختبار القص :

يختلف اختبار القص الستاتيكي عن الاختبارات الستاتيكية آتفة الذكر بأن الاجهاد المؤثر في عينة الاختبار أثناء القص يكون موازياً لمستوي مقطعها في حين

كان الاجهاد المؤثر في عينات الاختبار على الشد أو الضغط أو الانحناء عمودياً على مستوي مقطع هذه العينات •

إن تأمين إجهاد القص الصافي يتطلب التأثير في عينة الاختبار عرضياً بقوتين متقابلتين ومؤثرتين في مستوى واحد (انظر الشكل ٨ - ٢٥ a) وتحقيق ذلك يتطلب استعمال عدد ذات سكاكة متناهية في الصغر وهذا عملياً غير ممكن إذ أن سكاكة رؤوس القص يجب ألا تقل عن حدود معينة يحددها قطر عينة الاختبار وذلك بحيث تستطيع هذه الرؤوس تحمل القوى التي يجب تطبيقها ، لهذا فإن تأثير القوتين سيكون في مستويين مختلفين (انظر الشكل ٨ - ٢٥ b) أي



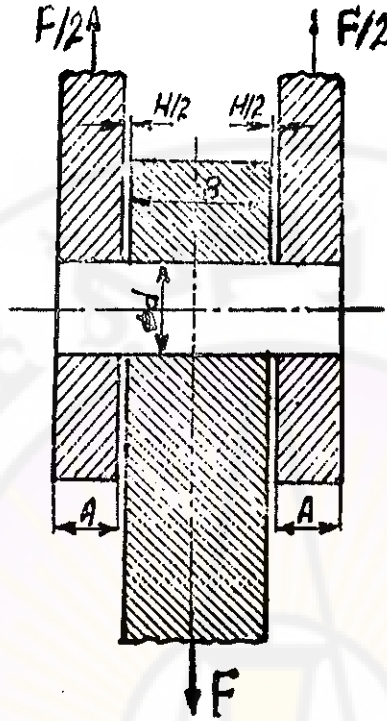
الشكل ٨ - ٢٥ : كيفية تطبيق قوى القص النظرية (a) والعملية (b) •

أنه بالإضافة لإجهادات القص فإن العينة سوف تتأثر بإجهادات انحناء أيضاً، لذلك فإن الدقة المطلوبة في اختبار القص لا يمكن الوصول إليها • ويكتفى عادة باستعمال تجربة القص لاختبار عينات من قطع الآلات المعرضة لإجهادات قص وفي ظروف مشابهة لظروف التجربة مثل المسامير والبراغي والتباشيم وغيرها وذلك بهدف تحديد مدى تحمل القص أو مقاومته لدى هذه العينات •

٨ - ٥ - ١ - إجراء الاختبار والوحدات المستنتجة

إن كل المحاولات المبذولة للحصول على إجهاد قص صافٍ (كما ذكرنا آنفاً) لم تنجح حتى تاريخه ، إذ أنه في جميع الأحوال لا بد أن تحدث في عينة الاختبار إجهادات شد أو ضغط أو كليهما معاً بالإضافة إلى إجهادات القص، ومع كل هذا يبقى الاهتمام الرئيس من اختبار القص هو تحديد جهد القص الأعظمي دون الأخذ بعين الاعتبار سلوك العينة المختبرة أثناء التحميل وماهي نوعية وقيم الانفعالات الأخرى التي تحدث وذلك بعكس ما هو متبع في الاختبارات الستاتيكية الأخرى • وتتووع في الوقت الحاضر طرق اختبار القص ولكن أكثرها شيوعاً واستخداماً هو القص المزدوج (أي تحديد جهد القص الأعظمي لعينة اسطوانية مماثلة لمسار البرشام) وقص الثقب (أي تحديد جهد القص الأعظمي لصفيحة معدنية عند إحداث ثقب فيها بواسطة رأس ثاقب) •

ويتم الاختبار الأول (أي اختبار القص المزدوج) على آلة الشد العامة حيث يثبت الرأس الحامل للقطعتين المتوازيتين على الرأس الثابت لآلة الشد ، أما اللسان المنزلق فتثبت نهايته على الرأس المتحرك للآلة ، ثم توضع عينة الاختبار في الثقب الذي يستد عبر قطع رأس القص الثلاثة والذي يتناسب قطره مع قطر العينة (انظر الشكل ٨ - ٢٦) • وبالتأثير في اللسان المنزلق بقوة شد أو ضغط تقص العينة عند مقطعين مختلفين أي عند السطحين الفاصلين بين اللسان المنزلق والقطعتين الجانبيتين • وتقاس خلال هذا الاختبار القوة فقط وتحسب مقاومة



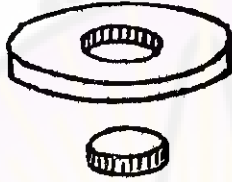
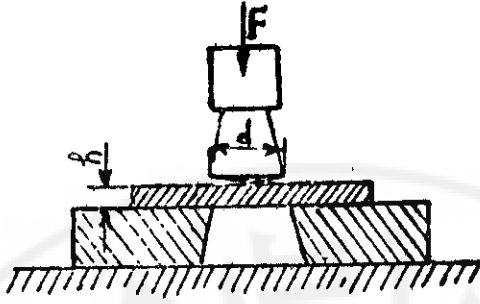
الشكل (٨ - ٢٦) : اختبار القص المزدوج

القص (أي الاجهاد الأعظمي للقص) بتقسيم أكبر قيمة للقوة يصل إليها التحميل على ضعف مساحة مقطع العينة ، أي أن :

$$T = \frac{F}{2A} \quad (8.48)$$

حيث : A - مساحة المقطع العرضي لعينة الاختبار .

أما الاختبار الثاني فيتم على صفائح من العينة المراد اختبار خواص القص لها حيث توضع الصفيحة بين الرأس الثاقب (السنبك) وقالب الثقب ثم تطبق عليها حمولة القص الستاتيكية عبر الرأس الثاقب (انظر الشكل ٨ - ٢٧) . ويتم



الشكل (٨ - ٢٧) : ثقب صفيحة معدنية بالقص

في هذه الحالة كما ذكرنا سابقاً تحديد مقاومة القص للصفيحة والتي هي إجهاد القص الأعظمي ، حيث يتم حساب هذا الاجهاد بتقسيم قوة القص الأعظمية على المساحة المعرضة لإجهاد القص من الصفيحة •

من الشكل (٨ - ٢٧) نلاحظ أن المساحة المعرضة لاجهاد القص هي :

$$A = \pi d h \quad (8.49)$$

حيث : d - قطر الرأس الثاقب •

h - سماكة الصفيحة •

وبالتالي فإن إجهاد القص الأعظمي يصبح مساوياً :

$$T_s = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi d h} \quad (8.50)$$

٨ - ٦ - اختبار القساوة :

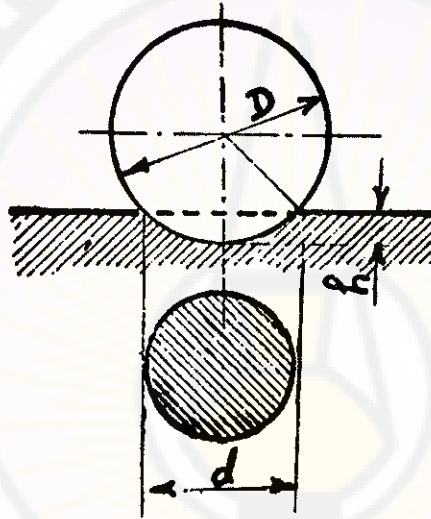
تعرّف القساوة بصفة عامة على أنها مقاومة سطح جسم لجسم آخر أقسى منه . وتعني مقاومة الجسم الأول للثاني هنا بالمقاومة ضد الخدش أو الاختراق أو التغلغل أو الصدم . ولهذا يقسم اختبار القساوة الى قسمين رئيسين وذلك تبعاً لنوع الحمل المطبق . فإذا كان الحمل ستاتيكيّاً سُمي اختبار القساوة الستاتيكية، وإذا كان الحمل المطبق ديناميكيّاً (أي اختبار القساوة عن طريق صدمة سطح المادة المختبرة بجسم قاسٍ) سُمي اختبار القساوة الديناميكية . وسوف نقوم هنا في البحث باختبار القساوة الستاتيكية ، أما اختبار القساوة الديناميكية فسوف نتحدث عنه عند دراستنا للاختبارات الديناميكية فيما بعد .

يعد اختبار القساوة من أهم الاختبارات ، وذلك نظراً لسهولة إجراء هذا الاختبار ولعدم الحاجة لصنع عينات اختبار خاصة من جهة ولأهمية قيم القساوة الناتجة في عمليات المقارنة وفي بعض الحسابات التصميمية من جهة أخرى .

وتشترك أكثر طرق اختبار القساوة الستاتيكية بالمبدأ العام ، حيث يتم وضع الجسم القاسي فوق السطح المستوي للينة أو القطعة المختبرة ثم يُحسّل بقوة معينة ، وبعد إزالة التحميل يقاس قطر انغراس الجسم في العينة أو أبعاده ، ونسبة القوة المطبقة الى سطح هذا الانغراس تعطي مقدار القساوة رقمياً . وتختلف طرق قياس القساوة عن بعضها بعضاً بنوع الجسم القاسي المستعمل وشكله ومقدار القوة المطبقة على هذا الجسم ، وأهم الطرق المستعملة وعلى نطاق واسع في قياس القساوة هي : طريقة برينل - طريقة فيكرز - طريقة روكويل . وسوف نبيّن فيما يلي الميزات الأساسية ومجالات استخدام كلٍ من هذه الطرق الثلاث :

٨-٦-١ - طريقة برينل :

يعتمد مبدأ هذه الطريقة على انغماس كرة من الفولاذ المقسى قطرها معلوم D وتحمل بقوة معينة F . فبعد التحميل تنغمس الكرة الفولاذية في سطح القطعة المختبرة وتترك في هذا السطح تقعرأ على شكل قطاع كروي عمقه h وقطر فتحته d (انظر الشكل ٨ - ٢٨) والرقم الذي يميز قساوة القطعة



الشكل (٨ ٢٨) : اختبار القساوة بطريقة برينل

هو النسبة بين القوة المطبقة ومساحة سطح هذا التقعر ، أي أن :

$$HB = \frac{F}{A} \quad (8.51)$$

ويُعد السطح هو سطح قطاع كروي مساحته :

$$A = \pi D h \quad (8.52)$$

أما عمق التقعر h فيحسب من العلاقة التالية :

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (8.53)$$

فتكون :

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (8.54)$$

أي أنه لحساب قيمة المساواة يجب أن تكون قيمة كل من قطر الكرة D والقوة F محددة ومعلومة . ولكي تكون قيم كل من D و F محدودة ومعلومة فانه لابد من اتباع شروط الاختبار الصحيح والمبني على معرفة مسبقة بمزايا هذه الطريقة والتي يمكن إدراجها كما يلي :

١ - يجب أن يكون سطح العينه (أي السطح المختبر والسطح المقابل له) مستويين ونظيفين تماماً وذلك ليتم تطبيق الحمولة بشكل عمودي على السطح المختبر من جهة وليتم امتصاص الطاقة المصروفة على احداث الانفاس من قبل العينه بشكل كامل من جهة أخرى .

٢ - إن أقطار الكرات المستعملة في طريقة برينل هي ١٠، ١٥، ٢٥، ٣٥، ٥٠، ٦٢، ٧٥، ٩٠، ١٠٠، ١٢٥، ١٥٠، ١٨٠، ٢٠٠، ٢٢٥، ٢٥٠، ٢٨٠، ٣١٥، ٣٥٠، ٣٨٠، ٤٠٠، ٤٥٠، ٥٠٠، ٥٦٠، ٦٣٠، ٧٠٠، ٧٦٠، ٨٠٠، ٩٠٠، ١٠٠٠ مم . ويجب أن يتراوح قطر فتحة التقعر d بين ربع ونصف قطر الكرة D . فإذا كان $(d < 0,25 D)$ فان سطح الانفاس قليل التكور ، أما إذا كان $(d \geq 0,5 D)$ فان السطح كثير التكور وفي كل من الحالتين لا يكون متناسباً مع قيمة المساواة .

٣ - يجب أن لايزيد عمق الانفاس h عن $\frac{1}{10}$ من سماكة القطعة المختبرة . وإذا تحققت العلاقة بين قطر فتحة التقعر d وقطر الكرة

$D (0,25 D < d \leq 0,5 D)$ فإن قيم h بالنسبة لقطر الكرة تتراوح بين $(0,015 D < h < 0,068 D)$ ، ويمكن استنتاج ذلك من العلاقة (8.53) على النحو التالي :

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{D}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \right] \quad (8.55)$$

فاذا أدخلنا في العلاقة السابقة (8.55) قيم d حيث $d_1 = 0,25 D$ و $d_2 = 0,5 D$ فإن :

$$h_1 = \frac{D}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1}{4}\right)^2} \right] = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{15}{16}} \right) = 0,015 D \quad (8.56)$$

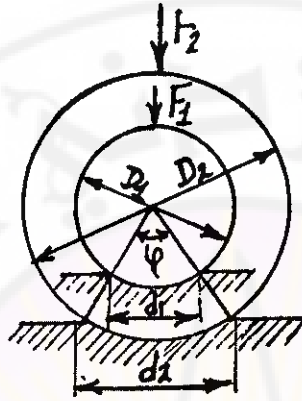
$$h_2 = \frac{D}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2} \right] = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{3}{4}} \right) = 0,068 D \quad (8.57)$$

وعلى هذا الأساس فإن سماكة العينة يجب أن لا تقل عن $0,15 D$.

٤- إن استخدام كرات بأقطار مختلفة عند قياس المساواة يتطلب منا أن نوجد الشروط الواجب التقيدها حتى تتمكن من مقارنة نتائج القياس حتى في حال اختلاف كلٍّ من أقطار الكرات وقوى التحميل المطبقة . فاذا قمنا بقياس مساواة معدن ما باستخدام كرتين بقطرين مختلفين فإنه يمكننا أن نحصل على قيم مساواة متساوية فقط في الحالة التي تكون الزاوية φ واحدة في كلا القياسين . فاذا كانت الزاوية φ واحدة حصلنا على تشابه هندسي بين فتحتي التقعر المتشكلتين (انظر الشكل ٨ - ٢٩) ومن الشكل نلاحظ أن :

$$\frac{d_1}{D_1} = \frac{d_2}{D_2} = \sin \frac{\varphi}{2} \quad (8.58)$$

وعند تساوي قيم القساوة ($H B_1 = H B_2$) وباستخدام العلاقة (8.58) على الرغم من اختلاف قيم الأقطار D_1 و D_2 وقيم قوى التحميل F_1 و F_2 نجد أن:



الشكل (٨ - ٢٩): العلاقة بين D و F عند تشابه فتحتي التقرع في القطعة المختبرة

$$\frac{F_1}{D_1^2} \left[\frac{2}{\pi \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right] = \frac{F_2}{D_2^2} \left[\frac{2}{\pi \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right] \quad (8.59)$$

ومنه نستنتج أن:

$$\frac{F_1}{D_1^2} = \frac{F_2}{D_2^2} = \dots = \frac{F}{D^2} = \text{const} \quad (8.60)$$

وهكذا نلاحظ أن تحقيق الشرط المتعلق بنسبة قطر الانفماس d الى قطر الكرة D يتم بالاختيار المناسب لقوة التحميل F مع قطر الكرة المستعملة ومع الأخذ بعين الاعتبار نوع مادة القطعة المقيسة . ولهذا وضعت العلاقة (8.60)

على شكل علاقة تجريبية لربط العوامل آتفة الذكر بعضها ببعض طبقاً لما يلي :

$$F = \beta D^2 \quad (8.61)$$

حيث : β - رقم يتعلق بنوع مادة القطعة المقيسة وتراوح قيمته بين 2,5 و 30 كما هو موضح في الجدول التالي :

$F (kg_f)$	رصاص - قصدير $F = 2,5D^2$	النيوم $F = 5D^2$	نحاس - خلانط النيوم $F = 10D^2$	الخلانط الحديدية $F = 30D^2$
$D (mm)$				
10	250	500	1000	3000
5	62,5	125	250	750
2,5	15,625	31,25	62,5	187,5

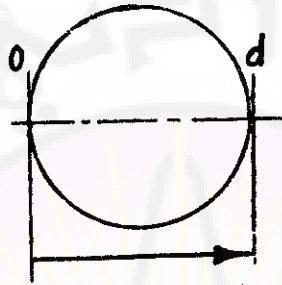
هـ - لتسهيل عملية قياس القساوة بطريقة برينل فقد وضعت جداول خاصة تعطي قيمة القساوة HB بتابعة قطر التقعر d وذلك لكل ازدواج ممكن بين F و D حسب الجدول السابق . ونورد على سبيل المثال واحداً من هذه الجداول التجريبية الخاصة والمتوافرة حالياً وذلك عندما يكون قطر الكرة $D = 10 mm$ والحمل المطبق $F = 3000 kgf$ والنسبة $F/D = 30$ (انظر الجدول ٨ - ١) .

٦ - أما قياس قطر التقعر d فيتم بواسطة جهاز بسيط يتألف من : مجهر ضوئي بغية تكبير التقعر بالمقدار الكافي وذلك لرؤيته بشكل واضح وقياس قطره بدقة - وميكرومتر لقياس هذا القطر بدقة بالغة تصل إلى (٠.٠٠١ مم) .
وأما إجراء القياس فيتم بجعل دائرة التقعر تمس أحد المستقيمين المتعامدين المتقاطعين في مركز العدسة الجسمية للجهاز والعمودي على محور حركة اللولب

الجدول (٨ - ١) : واحد من الجداول التجريبية لقيم القساوة المستنتجة
 بطريقة برينلي وذلك عندما يكون قطر الكرة (D = 10 mm) والحمل المطبق
 (F = 3000 kgf) والنسبة (F/D² = 30)

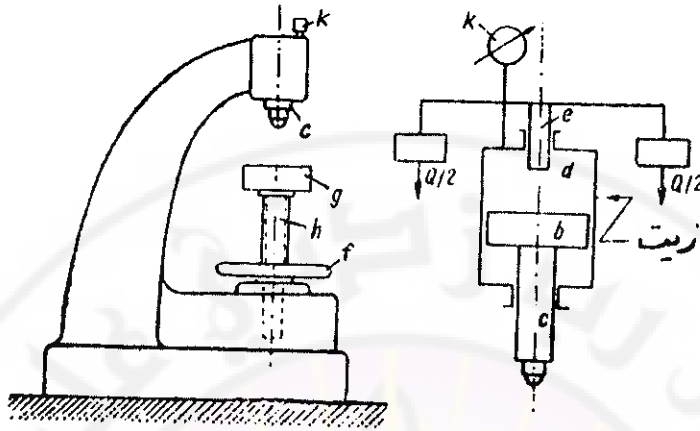
Diameter of Impression	0-00	0-01	0-02	0-03	0-04	0-05	0-06	0-07	0-08	0-09
mm										
2-50	601	597	592	587	582	578	573	569	564	560
2-60	555	551	547	543	538	534	530	526	522	518
2-70	514	510	507	503	499	495	492	488	485	481
2-80	477	474	471	467	464	461	457	454	451	448
2-90	444	441	438	435	432	429	426	423	420	417
3-00	415	412	409	406	404	401	398	395	393	390
3-10	385	383	380	378	375	373	370	368	366	366
3-20	353	351	349	347	345	343	341	340	345	343
3-30	341	339	337	335	333	331	329	328	325	323
3-40	321	319	317	315	313	311	309	307	306	304
3-50	302	300	298	297	295	293	292	290	288	286
3-60	285	283	282	280	278	277	275	274	272	271
3-70	269	268	266	265	263	262	260	259	257	256
3-80	255	253	252	250	248	246	245	245	244	242
3-90	241	240	239	237	235	235	234	232	231	230
4-00	229	228	226	225	224	223	222	221	219	218
4-10	217	216	215	214	213	212	211	210	209	208
4-20	207	205	204	203	202	201	200	199	198	197
4-30	197	196	195	194	193	192	191	190	189	188
4-40	187	186	185	185	184	183	182	181	180	179
4-50	179	178	177	176	175	174	174	173	172	171
4-60	170	170	169	168	167	167	166	165	164	164
4-70	163	162	161	161	160	159	158	158	157	156
4-80	155	155	154	154	153	152	152	151	150	150
4-90	149	148	148	147	146	146	145	144	144	143
5-00	143	142	141	141	140	140	139	138	138	137
5-10	137	136	135	135	134	134	133	133	132	132
5-20	131	130	130	129	129	128	128	127	127	126
5-30	126	125	125	124	124	123	123	122	122	121
5-40	121	120	120	119	119	118	118	117	117	116
5-50	116	115	115	114	114	114	113	113	112	112
5-60	111	111	110	110	110	109	109	108	108	107
5-70	107	107	106	106	105	105	105	104	104	103
5-80	103	103	102	102	101	101	101	100	99-9	99-5
5-90	99-2	98-8	98-4	98-0	97-7	97-3	96-9	96-6	96-2	95-9
6-00	95-5	—	—	—	—	—	—	—	—	—

في الميكرومتر من جهة • ومن جهة ثانية نفترض أن وضع التماس هذا يمثل الصفر على الميكرومتر ثم يزلق المستقيم المذكور (أي تزلق العدسة) وذلك بتدوير لولب الميكرومتر حتى يمس دائرة التقعر في الطرف المقابل • وبهذا الشكل يكون قد قطع مسافة مقدارها قطر التقعر p (انظر الشكل ٨ - ٣٠) •



الشكل (٨ - ٣٠) : مخطط قياس قطر التقعر d في طريقة برنيل •

٧ - أما تطبيق الحمل اللازم ستاتيكا (أي من الصفر وحتى قيمة معينة F بالتدريج) وترك هذا الحمل مؤثراً لفترة زمنية كافية لتشكل التقعر فإنه يتم بواسطة آلة اختبار القساوة نفسها • ويتوافر في الوقت الحاضر نوعان من آلات الاختبار هذه : الأول ويعمل بالمسنتات واللولب ، والثاني ويعمل هيدروليكيًا ، ولكن يفضل الاختبار بالآلة الهيدروليكية وذلك لسهولة استعمالها وضبطها • ويبيّن الشكل (٨ - ٣١) مخطط هذه الآلة مبسطاً • وأهم أجزاء هذه الآلة هي : الطاولة g الحاملة للقطعة المقيسة وهي قرص مستوي يحمله عمود شاقولي لولبي h يمكن رفعه أو خفضه حسب الحاجة بتدوير القرص f ، والرأس الحامل للكرة المنغسة c والذي يؤمن له القوة الضاغطة اتصاله بقرص مكبس هيدروليكي d حيث يحقق الضغط في اسطوانة هذا المكبس وضع أثقال Q على الحوامل الخاصة والمحمولة على السدادة المنزلقة للمكبس e وبحيث تتناسب هذه الأثقال مع القوة المراد تطبيقها •



الشكل (٨ - ٣١) : جهاز برينل لاختبار القساوة

٨-٦-٢ - طريقة فيكرز :

تم ابتكار هذه الطريقة من قبل شركة فيكرز بعد أن لوحظ أن طريقة برينل تتمتع بعدد من العيوب ، نذكر منها :

- ١ - لاتصلح طريقة برينل في قياس قساوة الصفائح الرقيقة .
- ٢ - لاتصلح طريقة برينل في قياس قساوة القطع التي يسبب وجود التقعرات عليها عدم امكان استعمالها بعد إجراء القياس .
- ٣ - تصبح قيم القساوة غير دقيقة عندما تتجاوز هذه القيم الرقم (400 HB) وعندها لا يمكن اعتماد هذه القيم . وتنتج عدم الدقة هذه بسبب التشوه الكبير الذي يحدث في الكرة الفولاذية المقساء والمستخدم في القياس . لهذا كانت تستخدم في هذه الحالة كرات مصنوعة من كربيد التنجستين المعروف بقساوته العالية وذلك قبل ابتكار طرق قياس القساوة الأخرى . ومع كل هذا فان هذه الطريقة لم تكن تستعمل عندما تتجاوز قيمة القساوة الرقم (650 HB) .

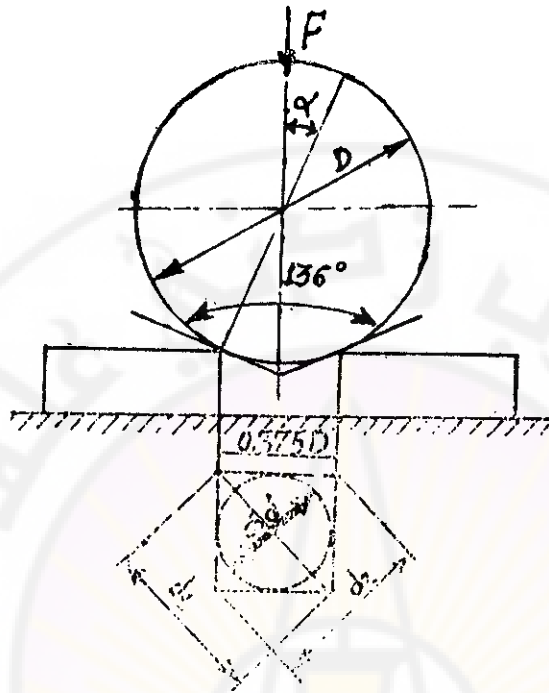
٤- إن اختيار قطر الكرة والحمل المناسب لكل نوع من أنواع المواد المقيسة بهدف تحقيق النسبة بين قطر التفرع d وقطر الكرة D أمر يتطلب الدقة والتغيير المستتر في الكرات والأحمال .

٥- إن قياس القساوة السطحية للقطع المعدنية المقساء سطحياً ولطبقات رقيقة أمر " غير ممكن وذلك لان عمق انغماس الكرة قد يتجاوز عمق الطبقة السطحية المقساء .

وتتفق طريقة فيكرز مع طريقة برينل من حيث المبدأ مع فارق واحد بين الطريقتين وهو استبدال الكرة الفولاذية بهرم رباعي من الماس الذي هو أكثر المواد المعروفة قساوة . ولهذا تعتمد طريقة فيكرز على تطبيق الحمل المناسب بواسطة هرم الماس الرباعي (الذي تبلغ زاوية رأسه 136°) بشكل عمودي على سطح عينة الاختبار ثم قياس مساحة الانغماس وتقسيم الحمل على هذه المساحة لتكون النتيجة هي رقم القساوة HV بطريقة فيكرز . أما اختيار زاوية الرأس للهرم مساوية 136° فقد تم انطلاقاً من المبدأ التالي :

لكي تكون نتائج القياس متساوية قدر الامكان مع نتائج طريقة برينل فقد اختيرت الزاوية الرأسية للهرم بحيث لو اختبرت قساوة قطعة ما بطريقة برينل لتكون القيمة $(\frac{d}{D} = 0,375)$ كقيمة وسطية ثم اختبرت القطعة نفسها بطريقة فيكرز وضمن شروط التحميل نفسها لنتج انغماس محيطه الخارجي على شكل مربع ، فلتكون نتائج القياس متقاربة يجب أن يكون المربع الناتج مربعاً خارجياً لدائرة انغماس برينل . وانطلاقاً من هذه الأسس والمثلة على الشكل (٨ - ٣٢) يمكن حساب الزاوية الرأسية للهرم كما يلي :

$$\frac{r}{R} = \frac{d}{D} = \sin \alpha = 0,375 \quad (8.62)$$



الشكل (٨ - ٣٢) : العلاقة بين دائرة انغماس برينل ومربع انغماس فيكرز .

أي أن :

$$\alpha = \arcsin 0,375 = 22^\circ \quad (8.63)$$

ومنه :

$$\beta = 2 (90 - \alpha) = 2 (90 - 22) = 136^\circ \quad (8.64)$$

أما مساحة الانغماس S والتي تتألف من أربعة مثلثات مسقطها على مستوي عينة الاختبار على شكل مربع مساحته S' ،حيث :

$$S = \frac{S'}{\cos 22^\circ} \quad (8.65)$$

وبما أن مساحة المربع من خلال وسطه قطريه $(d_m = \frac{d_1 + d_2}{2})$ هي :

$$S' = \frac{d_m^2}{2} \quad (8.66)$$

فإن مساحة الانعكاس S تساوي :

$$S = \frac{d_m^2}{2 \cdot \cos 22^\circ} \quad (8.67)$$

وعندئذ تكون المساواة السطحية للمادة وفق طريقة فيكرز مساوية :

$$HV = \frac{F}{S} = 2 \cdot \cos 22^\circ \cdot \frac{F}{d_m^2} \quad (8.68)$$

أو أن :

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{d_m^2} \quad (8.69)$$

تتمتع طريقة فيكرز بجموعة من المزايا تميزها عن طريقة برينل ، نذكر منها:

١ - يمكن باستخدام طريقة فيكرز أن نقيس المساوات المتوسطة (التي تقاس عادة بطريقة برينل) والمساوات العالية (التي تصل قيمها الى ما فوق 1000 HV) وذلك عندما تصبح طريقة برينل غير صالحة .

٢ - تتراوح قوة التحميل في طريقة فيكرز بين (0,5 ÷ 120 KP) وذلك تبعاً لساكنة الطبقة السطحية المراد اختبارها وقيم المساواة المتوقعة الحصول عليها . ومع كل هذا فإن الدقة في تقدير القوة هنا ليست ضرورية لأن ذلك لن يؤثر في قيمة المساواة التي نحصل عليها والتي لا تتعلق بمقدار القوة المطبقة .

٣- يمكن قياس المساواة السطحية للصفائح الرقيقة التي تصل سماكتها حتى (0,1 mm) .

٤- بما أن قيم المساواة لا تتعلق بقدار القوة المطبقة فإنه يمكننا إجراء قياس المساواة بجعل الحمل المطبق صغيراً وبالتالي حجم الانغماس سيكون صغيراً أيضاً وهذا يمكننا من إزالة آثار الاختبار بسهولة وذلك عندما يكون مطلوباً سطوح مصقولة للقطعة بعد اختبارها .

٥- يمكننا طريقة فيكرز من قياس مساواة السطوح المقاسة إلى عمق بسيط أو السطوح المغلقة .

٦- يمكن قياس قطري الانطباع d_1 و d_2 بعد إزالة التحميل مباشرة وذلك بواسطة مجموعة عدسات ضوئية تشكل للانطباع الرباعي خيالا مكبرا على شاشة مركبة في الجزء العلوي من الجهاز ومزودة ببيكرومتر .

٧- لقد دلت التجربة على أن هناك تناسباً واضحاً في خلائط الفولاذ بين المساواة وحد المتانة ، حيث :

$$\sigma_b = (0,28 \div 0,32) HV \quad (8.70)$$

لهذا كثيراً ما يعني قياس المساواة عن اختبار الشد عندما لا تكون الدقة المطلوبة في تقدير حد المتانة للفولاذ .

٨- ٦- ٣- طريقة روكويل :

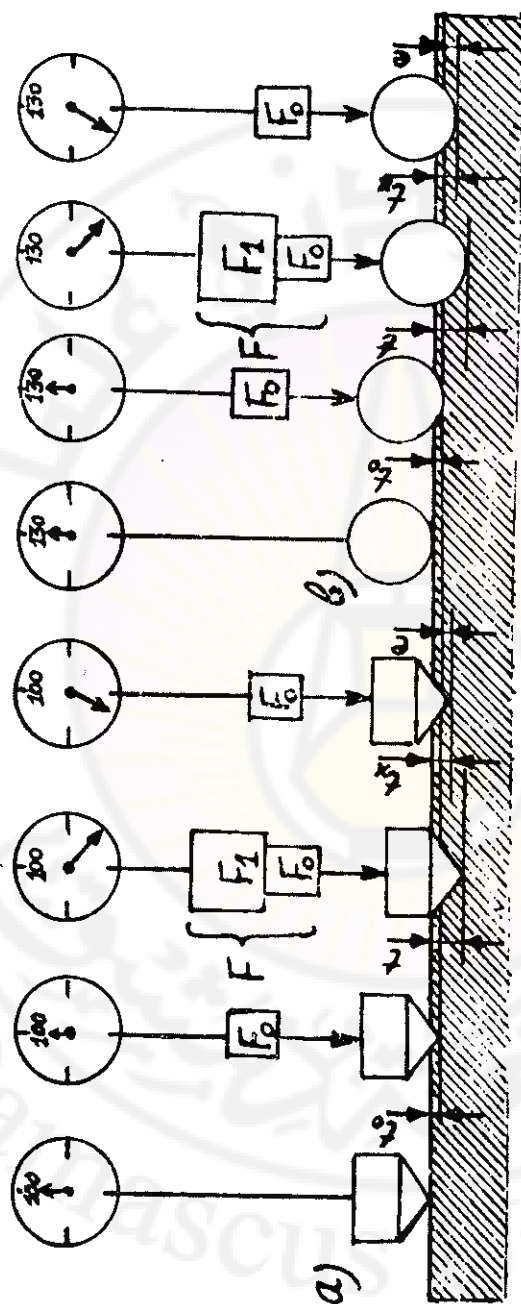
إن ما يؤخذ على كلٍ من طريقتي برينل وفهكرز هو البطء في الحصول على النتائج الرقيمة ، حيث لا بد بعد إجراء الاختبار من إجراء القياسات المجهرية لأبعاد

الانطباع (الانغماس) ثم حساب المساواة باستخدام العلاقات آتفة الذكر أو الرجوع الى الجداول الخاصة للحصول على قيمة هذه المساواة . أما طريقة روكويل فقد تخلصت من هذا العيب وذلك باعتمادها مبدأ مختلفاً عن المبدأ المتبع في الطريقتين السابقتين .

إن الأجهزة المستعملة في قياس المساواة بطريقة روكويل تشبه من حيث الشكل وطريقة العمل أجهزة برينل وفيكرز ، غير أن المبدأ المتبع هنا هو قياس عمق الانغماس فقط ، وعمق الانغماس هذا يتناسب عكساً مع المساواة ، لذلك فقد زودت أجهزة قياس روكويل بعدادات خاصة تعطي مباشرة أرقاماً تتناسب عكساً مع عمق الانغماس وطرذاً مع مساواة القطعة المقيسة . ويبيّن الشكل (٨-٣٣) مراحل استخدام هذه الطريقة في قياس المساواة والتي تتم على النحو التالي :

١- يستعمل كجسم للانغماس إما كرة فولاذية مقساة قطرها $\frac{1}{16}$ انشاً وبحمولة كلية مقدارها (100 Kp) عند قياس المساوات الصغيرة وتأخذ المساواة المقيسة في هذه الحالة الرمز HRb ، أو يستعمل مخروط من الماس زاويته ١٢٠° وبحمولة كلية مقدارها (150 Kp) عند قياس المساوات الكبيرة وتأخذ المساواة المقيسة في هذه الحالة الرمز HRc . ويستخدم القرص المدرج على الجهاز باللون الاسود حتى الرقم (100) للرمز HRc وباللون الاحمر حتى الرقم (130) للرمز HRb .

٢- توضع عينة الاختبار على طاولة الجهاز حتى تلامس الرأس القاسي (الكرة أو المخروط) ثم تطبق الحمولة الأولية ومقدارها (10 Kp) وذلك لضمان التلامس الصحيح مع سطح العينة ، وبعد العمق الذي ينغرز اليه الجسم بعد التحميل الاول t_0 هو بداية القياس ويغير عداد القياس (القرص المدرج) بحيث



الشكل (٨ - ٣٣) : مراحل استعمال طريقة روكويل في قياس التساوية وذلك باستخدام المخروط (a) أو الكرة (b) .

يشير مؤشره الى الرقم (100) في حال استخدام المخروط وللرقم (130) في حال استخدام الكرة .

٣ - يحمل الرأس بعدئذ بالحمل المتمم F_1 وهو (90 KP) للكرة وليصبح الحمل الكلي (100 KP) و (140 KP) للمخروط وليصبح الحمل الكلي (150 KP) . ويتم التحميل ببطء بمساعدة مكبس هيدروليكي صغير . وبعد هذا التحميل بالحمل الكلي ينغرز جسم الانغماس الى العمق t وهذا الانغماس الكلي هو : الانغماس المرن + الانغماس المتبقي (اللدن) .

٤ - بعدئذ يرفع الحمل المتمم F_1 فيتراجع رأس جسم الانغماس الى العمق t_x (أي يزول الانغماس المرن ويبقى الانغماس اللدن) ، والفرق بين t_0 و t_x هو المسافة c التي تتناسب عكسا مع قساوة القطعة ، لذلك صمم المداد ليعطي مباشرة أرقاما تتناسب مع القساوة ، حيث درجت لوحته عكسياً من 100 الى الصفر (في حالة المخروط) ومن 130 إلى الصفر (في حالة الكرة) وليكون العمق المقيس بين هذين الجدين هو ٢٠ مم في حالة استخدام المخروط و ٢٦ مم في حالة استخدام الكرة ، أي أن كل تدريج على لوحة العداد يعادل انغماساً قدره ٠.٠٠٢ مم .

٥ - مما سبق نستنتج أنه إذا بلغ عمق الانغماس عند استخدام المخروط ٢٠ مم (أو ٢٦ مم عند استخدام الكرة) فإن العداد سوف يشير الى الصفر أما إذا عاد رأس الانغماس الى النقطة t_0 فإن العداد سوف يشير عندئذ الى الرقم 100 عند استخدام المخروط (أو الى الرقم 130 عند استخدام الكرة) . أما إذا كانت عودة رأس الانغماس الى نقطة t_x واقعة بين النقطتين الحديتين السابقتين وكما هو الحال في مثالنا الميكن على الشكل (٨ - ٣٣) فإن العداد

سوف يشير الى الرقم الذي يكمل e الى 100 (أو إلى 130) والرقم المكمل هذا يتناسب طردياً مع قساوة القطعة • وهذا الرقم هو رقم نسبي لا يميز بوحدة معينة ويمكن حسابه على النحو التالي :

$$HRc = 100 - \frac{e \text{ (mm)}}{0,002 \text{ (mm)}} \quad \text{في حال المخروط :}$$

$$HRb = 130 - \frac{e \text{ (mm)}}{0,002 \text{ (mm)}} \quad \text{في حال الكرة :}$$

تمتاز طريقة روكويل كما ذكرنا بالسرعة وعدم الحاجة للحسابات أو الجداول المساعدة ، كما أنه باستعمال أحمال أولية ومتسعة أصغر من الأحمال السابقة يتم اختبار قساوة مختلف المواد ومختلف السماكات والطبقات السطحية ، حيث يمكن استخدام الأحمال (45 KP و 30 KP و 15 KP) في اختبارات القساوة بهذه الطريقة بدلاً من الأحمال الكبيرة آتفة الذكر •

وتتوافر في الوقت الحاضر جداول خاصة تبين علاقة قيم القساوة المستنتجة بطريقة روكويل وباستخدام رؤوس انغماس مختلفة وأحمال مختلفة أيضاً مع قيم القساوة المستنتجة بطريقتي برينل وفيكر (انظر الجدولين ٨ - ٢ و ٨ - ٣) ، حيث يظهر هذان الجدولان المقارنة التقريبية بين قيم القساوة المستنتجة بالطرق الثلاث ذلك لأنه لم تتوافر حتى الآن العلاقات الرياضية المطلقة للتحويل من قيم مستنتجة بطريقة مامن الطرق الثلاث إلى طريقة أخرى •

الجدول (٨ - ٢) : مقارنة القيم التقريبية للقساوة المستنتجة بطريقة روكويل

(باستخدام كرة قطرها $\frac{1}{16}$ بوصة) وبطريقة برينل .

طريقة برينل	HRB	15T	30T	45T	طريقة برينل
دوكويل - كرة - (100 kg f)	100	93.0	82.0	72.0	201
دوكويل - كرة - (15 kg f)	93	92.8	81.5	71.0	195
دوكويل - كرة - (30 kg f)	98	92.3	81.0	70.0	189
دوكويل - كرة - (45 kg f)	97	92.0	80.5	69.0	184
	96	91.7	80.0	68.0	179
	95	91.5	79.0	67.0	175
	94	91.2	78.5	66.0	171
	93	91.0	78.0	65.5	167
	92	90.7	77.5	64.5	163
	91	90.3	77.0	63.5	160
	90	90.0	76.0	62.5	157
	89	89.7	75.5	61.5	154
	88	89.3	75.0	60.5	151
	87	89.0	74.5	59.5	148
	86	88.7	74.0	58.5	145
	85	88.3	73.5	58.0	142
	84	88.0	73.0	57.0	140
	83	87.7	72.0	56.0	137
	82	87.3	71.5	55.0	135
	81	87.0	71.0	54.0	133
	80	86.7	70.0	53.0	130
	79	86.3	69.5	52.0	128
	78	86.0	69.0	51.0	126
	77	85.7	68.0	50.0	124
	76	85.3	67.5	49.0	122
	75	85.0	67.0	48.5	120
	74	84.7	66.0	47.5	118
	73	84.3	65.5	46.5	116
	72	84.0	65.0	45.5	114
	71	83.7	64.0	44.5	112
	70	83.3	63.5	43.5	110
	69	83.0	62.5	42.5	109
	68	82.7	62.0	41.5	107
	67	82.3	61.5	40.5	106
	66	82.0	60.5	39.5	104
	65	81.7	60.0	38.5	102
	64	81.3	59.5	37.5	101
	63	81.0	58.5	36.5	99
	62	80.7	58.0	35.5	98
	61	80.3	57.0	34.5	96
	60	80.0	56.5	33.5	95
	59	80.0	56.0	32.0	94
	58	79.7	55.0	31.0	92
	57	79.3	54.5	30.0	91
	56	79.0	54.0	29.0	90

طريقة برينل	HRB	15T	30T	45T	طريقة برينل
دوكويل - كرة - (100 kg f)	55	78.7	53.0	28.0	89
دوكويل - كرة - (15 kg f)	54	78.3	52.5	27.0	87
دوكويل - كرة - (30 kg f)	53	78.0	51.5	26.0	86
دوكويل - كرة - (45 kg f)	52	77.7	51.0	25.0	85
	51	77.3	50.5	24.0	84
	50	77.0	49.5	23.0	83
	49	76.7	49.0	22.0	82
	48	76.3	48.5	20.5	81
	47	76.0	47.5	19.5	80
	46	75.7	47.0	18.5	79.5
	45	75.3	46.0	17.5	79
	44	75.0	45.5	16.5	78
	43	74.7	45.0	15.5	77
	42	74.3	44.0	14.5	76
	41	74.0	43.5	13.5	75
	40	73.7	43.0	12.5	74.5
	39	73.3	42.0	11.0	74
	38	73.0	41.5	10.0	73
	37	72.7	40.5	9.0	72
	36	72.3	40.0	8.0	71.5
	35	72.0	39.5	7.0	71
	34	71.7	38.5	6.0	70
	33	71.3	38.0	5.0	69
	32	71.0	37.5	4.0	68.5
	31	70.7	36.5	3.0	68
	30	70.3	36.0	2.0	67
	29	70.0	35.5	1.0	66.5
	28	69.7	34.5	—	66
	27	69.3	34.0	—	65.5
	26	69.0	33.0	—	65
	25	68.7	32.5	—	64
	24	68.3	32.0	—	63.5
	23	68.0	31.0	—	63
	22	67.8	30.5	—	62.5
	21	67.5	29.5	—	62
	20	67.2	29.0	—	61.5
	19	67.0	28.5	—	61
	18	66.7	27.5	—	60.5
	17	66.3	27.0	—	60
	16	66.0	26.0	—	59.5
	15	65.7	25.5	—	59
	14	65.3	25.0	—	58.5
	13	65.0	24.0	—	58
	12	64.7	23.5	—	57.7
	11	64.3	23.0	—	57.3
	10	64.0	22.0	—	57

الجدول (٨ - ٣) : مقارنة القيم التقريبية

للقساوة المستنتجة بالطرق الثلاث

(رو كويل - برينل - فيكرز) .

طريقة فيكرز	طريقة برينل	روكويل - مغروط - (45 kgf)	روكويل - مغروط - (30 kgf)	روكويل - مغروط - (15 kgf)	روكويل - مغروط - (60 kgf)	روكويل - مغروط - (150 kgf)
HV	HB	45M	30M	15M	HRA	HRC
1870	—	07.0	92.0	98.7	92.0	80
1790	—	86.5	91.5	96.3	91.5	79
1710	—	85.6	91.0	96.0	91.0	78
1630	—	84.5	90.5	95.8	90.5	77
1560	—	83.5	90.0	95.5	90.0	76
1480	—	82.6	89.0	95.2	89.6	75
1400	—	81.6	88.5	95.0	89.0	74
1320	—	80.5	88.0	94.8	88.6	73
1250	—	79.5	87.0	94.6	88.0	72
1160	—	78.5	86.5	94.2	87.0	71
1080	—	77.5	86.0	94.0	86.5	70
1000	—	76.5	85.0	93.7	86.0	69
940	—	75.5	84.5	93.3	85.5	68
890	—	74.5	83.5	93.0	85.0	67
850	—	73.0	83.0	92.5	84.5	66
820	—	72.0	82.0	92.0	84.0	65
790	—	71.0	81.0	91.8	83.5	64
760	—	70.0	80.0	91.3	83.0	63
740	—	69.0	79.0	91.0	82.5	62
715	—	67.5	78.5	90.5	81.5	61
695	615	66.5	77.5	90.0	81.0	60
675	600	65.5	76.5	89.8	80.5	59
655	590	64.0	75.5	89.3	80.0	58
635	575	63.0	75.0	89.0	79.5	57
620	560	62.0	74.0	88.5	79.0	56
600	550	61.0	73.0	88.0	78.5	55
580	540	60.0	72.0	87.5	78.0	54
560	530	59.5	71.0	87.0	77.5	53
545	510	67.5	70.5	86.5	77.0	52
530	500	56.0	69.5	86.0	76.5	51
515	485	65.0	68.5	85.5	76.0	50
500	470	64.0	67.5	85.0	75.5	49
485	460	62.5	66.5	84.5	74.5	48
470	450	61.5	66.0	84.0	74.0	47
458	437	60.0	65.0	83.5	73.5	46
446	426	59.0	64.0	83.0	73.0	45
435	415	58.0	63.0	82.5	72.5	44
424	404	56.5	62.0	82.0	72.0	43
413	393	56.5	61.5	81.5	71.5	42
403	382	54.5	60.5	81.0	71.0	41
393	372	53.0	59.5	80.5	70.5	40
383	362	52.0	58.5	80.0	70.0	39
373	352	51.0	57.5	79.5	69.5	38
363	342	50.5	56.5	79.0	69.0	37
353	332	50.0	56.0	78.5	68.5	36
343	322	50.0	55.0	78.0	68.0	35
334	313	50.0	54.0	77.0	67.5	34
325	305	50.0	53.0	76.5	67.0	33
317	297	50.0	52.0	76.0	66.5	32
308	290	50.0	51.5	75.5	66.0	31
301	283	50.0	51.5	75.0	65.5	30
293	276	50.0	50.5	74.5	65.0	29
285	270	50.0	50.0	74.0	64.5	28
278	265	50.0	49.5	73.5	64.0	27
271	260	50.0	49.0	73.0	63.5	26
264	255	50.0	48.0	72.0	63.0	25
257	250	50.0	47.0	71.5	62.5	24
251	245	50.0	46.0	71.0	62.0	23
248	240	50.0	45.0	70.5	61.5	22
241	235	50.0	44.5	70.0	61.0	21
236	230	50.0	44.0	69.5	60.5	20

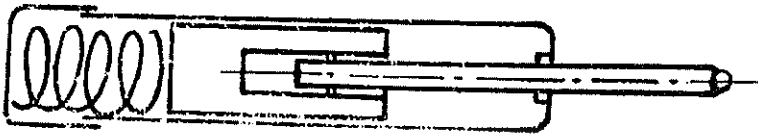
الاختبارات الديناميكية

٨ - ٧ - اختبارة القساوة الديناميكية :

تتنوع الطرق الديناميكية لاختبار القساوة ، وعلى الرغم من تنوعها إلا أنها تأتي في المرتبة الثانية بعد الطرق الستاتيكية وذلك بسبب احتمال حدوث أخطاء في القياس أثناء الاختبار أو بعده . ولكن أهم ما يميز هذه الطرق هو بساطة الاجهزة المستخدمة وسهولة استعمالها والسرعة في إجراء الاختبار . ويمكن تصنيف طرق القساوة الديناميكية الى مجموعتين :

١ - المجموعة الأولى : وتعتمد مجموعة الطرق هذه مبدأ طريقة برينل والذي يعد القساوة متناسبة عكساً مع سطح الانغماس الذي يحدثه الجسم أو تحدثه الأداة المستعملة لهذه الغاية . وأكثر الطرق انتشاراً واستخداماً في هذه المجموعة هي طريقة غريفن (Graven method) وطريقة بولدي (Poldi method) . ويجرى الاختبار وفق طريقة غريفن باستخدام المطرقة الميئة على الشكل (٨ - ٣٤) حيث تلامس الكرة المحمولة على طرف المحور سطح عينة الاختبار في بداية الامر وعلى أن تكون المطرقة متوضعة عمودياً على سطح العينة ثم يتم ضغط النابض بقوة كافية لفك الارتباط بين المحور ووصلة الصدم فتحدث الصدمة من قبل الكرة على سطح العينة . بعد ذلك يقاس قطر الانغماس ، ومن المنحني المرفق مع المطرقة نحصل على القساوة المقابلة لهذا القطر (٨ - ٣٥) .

أما إجراء الاختبار وفق طريقة بولدي فيتم أيضاً باستخدام مطرقة بولدي وهي جسم اسطواناني ثبتت في نهايته كرة فولاذية مقساة (انظر الشكل ٨ - ٣٦) ، وينزل داخل الجسم طولياً لسان متحرك ، يفصله عن السطح العلوي للكرة



الشكل (٨ - ٣٤) : رسم تخطيطي لطريقة غريفين

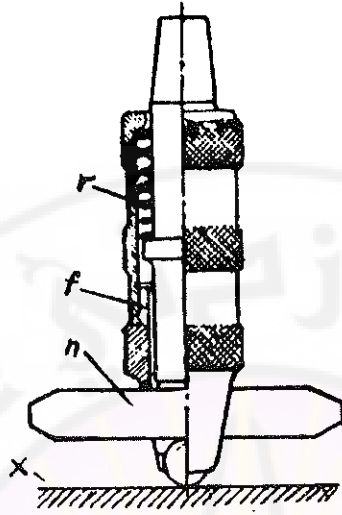


الشكل (٨ - ٣٥) : العلاقة بين قيم القساوة وقطر الانساس عند استخدام مطرقة غريفين

ثقب يخترق الجسم الاسطواني عرضياً توضع فيه عينة مقارنة n معروفة القساوة. وعند وضع هذه الأداة عمودياً على سطح العينة المراد اختبارها « α » والطرق بسطريقة على النهاية العلوية للسان المتحرك تحدث الكرة انطباعين أحدهما على سطح العينة والآخر على السطح السفلي لعينة المقارنة. وبقياس قطري الانطباعين المذكورين يمكن حساب قساوة العينة المراد اختبارها من العلاقة التالية :

$$\frac{HB_x}{HB_n} = \frac{d_n^2}{d_x^2} \quad (8.71)$$

٢ - المجموعة الثانية : وتعتمد مجموعة الطرق هذه في مبدئها على كون المادة الأكثر قساوة هي الأكثر مرونة (مبدأ طريقة روكويل) . لذلك إذا ألقينا بالكرة

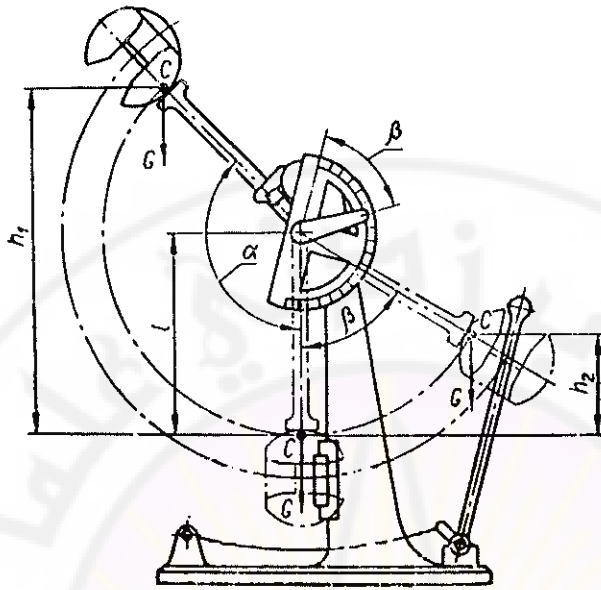


الشكل (٨ - ٣٦) : رسم تخطيطي لطريقة بولدي

(أو أي جسم انغماس آخر) من ارتفاع معين بشكل حر على سطح عينة الاختبار فان جزءاً من الطاقة الكامنة لدى الكرة (أو جسم الانغماس) يصرف على إحداث انفعالات لدنة متبقية في سطح العينة (أي احداث انغماس صغير في هذا السطح) بينما يصرف الجزء الباقي من هذه الطاقة الكامنة على شكل طاقة مرنة ترفع الكرة (أو جسم الانغماس) بفعل الارتداد عن السطح الى ارتفاع معين أقل من ارتفاع السقوط • ويتناسب ارتفاع الارتداد هذا مع قساوة القطعة • وبقياس الارتفاع الذي ترتد إليه الكرة (أو جسم الانغماس) نحصل على رقم يميز القساوة للعينة المختبرة •

٨ - ٨ - اختبار الصدم :

لدراسة مقدرة المادة على مقاومة الصدم التي يمكن أن تتعرض لها أثناء



الشكل (٨ - ٣٧) : رسم تخطيطي لآلة اختبار الصدم

الاستغلال يُجرى نوع خاص من الاختبارات يُسمى اختبار الانحناء الصدمي ، والهدف منه تعيين المتانة الصدمية لعينات تحتوي على حزوز (أو أثلام) صنعت مسبقاً بالطرق الميكانيكية المعروفة • ويشتمل لاجراء هذا الاختبار ما يُسمى آلة الصدم الميَّنة على الشكل (٨ - ٣٧) • ويُبين الشكل (٨ - ٣٧) رسماً تخطيطياً لهذه الآلة وكيف يتم توجيه الصدمة على عينة الاختبار بواسطة مطرقة نواسية ذات ثقل معين G ومرفوعة الى ارتفاع أولي h_1 وتترك المطرقة تهبط بفعل ثقلها وتنوس حول محور دورانها وعندما تصل الى الوضع الشاقولي تصطدم أداها القاطعة (المزود بها رأس المطرقة) بالعينة من الوجه المقابل للوجه الموجود فيه الحز (أو الثلم) فتخني العينة وتكسرها وتستمر بالنوسان إلى الجهة الأخرى ولكن الى ارتفاع h_2 أقل من h_1 (انظر الشكل ٨ - ٣٧) • وعندها فان العمل المصروف على كسر العينة يمكن حسابه من فرق

هذين الارتفاعين ووزن المطرقة من العلاقة التالية :

$$W = G (h_1 - h_2) \quad (8.72)$$

وبما أن طول الذراع l معلوم ويمكن أيضاً معرفة مقدار الزاويتين α و β اللتين يميل بهما هذا الذراع على الشاقول قبل سقوط المطرقة وبعد نوسانها إلى الجهة المقابلة فإن العلاقة (8.72) تؤول إلى الشكل التالي :

$$W = G l (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (8.73)$$

وبما أن القيم الموجودة في العلاقة (8.73) كلها قيم معلومة عدا قيمة الزاوية β فإن قياس هذه الزاوية يتم أثناء الاختبار بواسطة مؤشر احتكاكي يتحرك أمام قوس مدرجة ويدوره ذراع المطرقة أثناء نوسانه في الشوط الأول ليركه عند أعلى نقطة يصلها في الجانب الآخر (انظر الشكل ٨ - ٣٧) .

فاذا قسمنا العمل الكلي المحسوب بالعلاقة (8.73) على مساحة مقطع العينة الصافي عند الحز (أو الثلم) فالتا نحصل على مايسمى العمل النوعي للصدم (أو مايسمى عادةً متانة الصدم للمادة المختبرة) وذلك بالعلاقة :

$$a_k = \frac{W}{A} (\text{kg}_f \cdot \text{m/cm}^2) \quad (8.74)$$

تتعلق قيمة العمل النوعي للصدم (متانة الصدم) بعوامل كثيرة ، نذكر منها: شكل العينة وشكل الحز (أو الثلم) وأبعاد الحز (بخاصة نصف قطر تحذب سطحه الداخلي) وسرعة الصدم . ولهذا فإن هذه القيمة غير ثابتة للمعدن نفسه وفي ظروف الاختبار نفسها . ولكن بهدف تسهيل فهم هذه القيمة وجعلها قابلة للاستعمال كصفة ميكانيكية معينة للمادة تم اعتبار هذه القيمة مؤلفة من مركبتين وفق المعادلة التالية :

$$a_k = a_{k1} + a_{k2}$$

(8.75)

حيث a_{k1} - العمل النوعي المصروف على بدء تشكل التشقق في العينة (أي العمل النوعي المصروف حتى لحظة ظهور التشقق) *
 a_{k2} - العمل النوعي المصروف على انتشار هذا التشقق حتى انكسار العينة بشكل كامل *.

ولهذا فإنه لا يتم في الوقت الحاضر تعيين العمل النوعي الكلي (a_k) للصدم وإنما يتم تحديد العمل النوعي المصروف على انتشار التشقق فقط (a_{k2}) ، ذلك لأن الأخير لا يتعلق بشكل الحز ولا بأبعاده وإنما يتعلق بنوع المادة ودرجة حرارة الاختبار ، لذلك يمكن اعتبار قيمة هذا العمل بالذات هي التي تحدد مدى المقاومة للصدم عند المادة ويمكن اعتبار هذه القيمة كصفة ميكانيكية للمادة * وعلى هذا الأساس فإن اختيار شكل الحز وأبعاده للعينة نفسها يلعب دوراً حاسماً في الحصول على قيم مميزة ومعقولة وقابلة للمقارنة مع قيم أخرى *

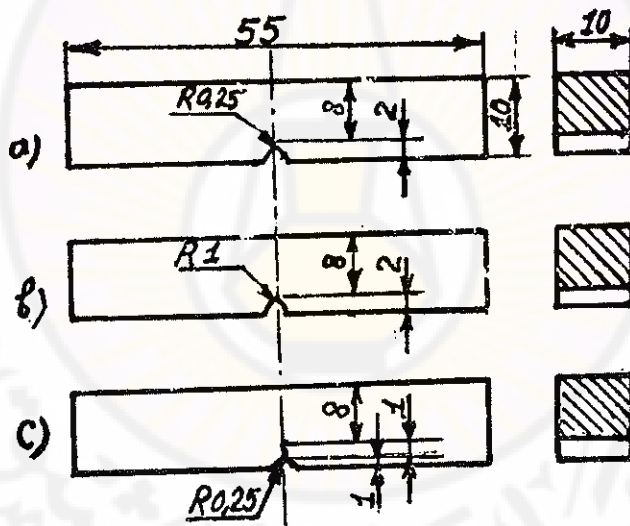
٨ - ٨ - ١ - اختيار العينات المستخدمة في اختبار الصدم :

يتنوع شكل العينات المستخدمة وأبعادها في اختبار الصدم ، ولكن أكثر العينات شيوعاً واستخداماً في هذا الاختبار هي تلك العينات التي تعد وفق أحد النماذج الثلاثة التالية :

١ - نموذج تشاربي (Charpy) : وتكون أبعاد العينة المعدة وفق هذا النموذج مساوية ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$) وتحتوي على حز (أو ثلم) على شكل V يبلغ عمقه (2 mm) ونصف قطر تحدب سطحه الداخلي ($P = 0,25 \text{ mm}$) * وتعد هذه العينة عادةً وفق المواصفات المعروفة (انظر الشكل ٣٨-٨) *

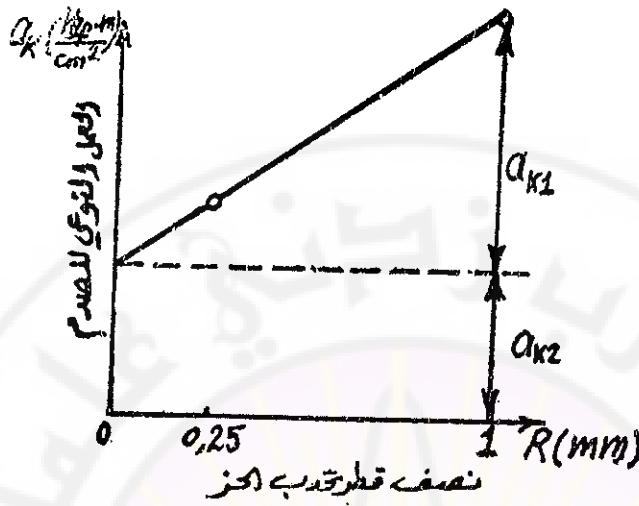
٢ - نموذج إيزود (Izod) : وتكون أبعاد العينة المعدة وفق هذا النموذج مساوية ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$) وتحتوي على حز على شكل U يبلغ عمقه (2 mm) ونصف قطر تحدب سطحه الداخلي ($R = 1 \text{ mm}$) . وتعد هذه العينة عادةً وفق المواصفات المعروفة (انظر الشكل ٨ - ٣٨) .

٣ - النموذج الحديث : وتكون أبعاد العينة المعدة كما في النموذجين السابقين مساوية ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$) وتحتوي على حز على شكل V يبلغ عمقه (1 mm) ونصف قطر تحدب سطحه الداخلي ($R = 0,25 \text{ mm}$) ويتم في هذه العينة إنماء تشقق تعبوي وذلك باستخدام آلات اختبار التعب أو على آلات اهتزاز تعد خصيصاً لهذه الأغراض (انظر الشكل ٨ - ٣٨ c) .



الشكل (٨ - ٣٨) : نماذج العينات المستخدمة في اختبار الصدم.

إن إنماء التشقق التعبوي في النموذج الثالث يعني جعل نصف قطر تحدب الحز على عمق (2 mm) مساوياً الصفر ، وبهذا الشكل تتخلص عملياً من العمل النوعي المصروف حتى لحظة ظهور التشقق (أي تتخلص من القيمة a_{k1}) ،



الشكل (٨ - ٣٩) : علاقة العمل النوعي للصدم بنصف قطر تدب الحز .

ذلك لأن العمل النوعي في هذه الحالة يصرف على انتشار التشقق فقط .
وعلى هذا الأساس وباختبار عينات ذات أنصاف أقطار تحادب للحزوز
مختلفة (مثلاً من أجل $R = 1 \text{ mm}$ و $R = 0,25 \text{ mm}$ وحمل قيم العمل النوعي
للصدم على المخطط المبين على الشكل (٨ - ٣٩) واستخدام طريقة التقريب
الخارجي (extrapolation) يمكننا أن نحصل على قيمة العمل النوعي للصدم
من أجل $(R = 0)$.

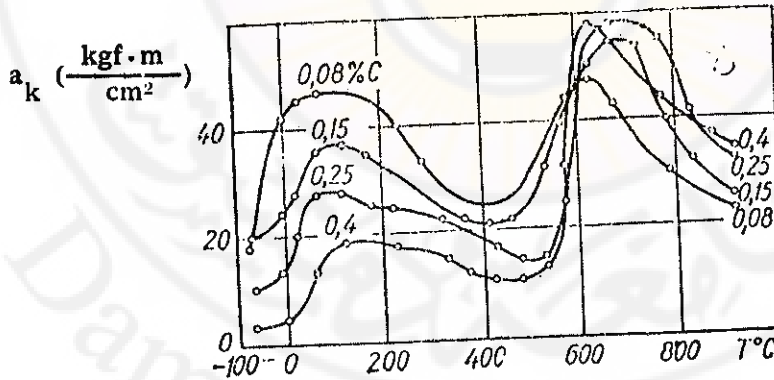
٨ - ٨ - ٢ - مجالات استخدام نتائج اختبار الصدم :

على الرغم من كثرة استخدام اختبار الصدم في تقويم مقاومة الصدم عند
المواد المختلفة ، وعلى الرغم من توافر قيم كثيرة لمثانة الصدم لأي مادة أو معدن
وفي درجات حرارة اختبار مختلفة ، إلا أن هذه القيم لم تدخل في أي من
الحسابات التصميمية حتى هذا التاريخ . ويقتصر استخدام هذا النوع من
الاختبارات الديناميكية والقيم الناتجة عنه على مايلي :

١- في المفاضلة بين معدن وآخر أو مادة وأخرى وذلك عند تصنيع قطعة في آلة ما أو تصميم إنشاء يمكن أن تتعرض قطعة أثناء عملها لظروف مشابهة لظروف الاختبار .

٢- اختبار مدى حساسية المادة وانخفاض قدرتها على تحمل الصدمات عند وجود حزوز أو شقوق على سطح المادة ، حيث أن هذه الحزوز أو الشقوق تسبب تركيزاً في الاجهادات بالقرب من النهاية الحادة للحز أو التشقق وتجعل الاجهادات اجهادات مركبة ثلاثية المحاور . ويتم اختبار ذلك بصنع عينات نظامية معدة وفق المواصفات المعروفة من المادة المختبرة أو بصنع عينات تحتوي على أثلام أو حزوز ذات أشكال وأبعاد مماثلة لتلك الموجودة في القطعة المعرضة للاستخدام .

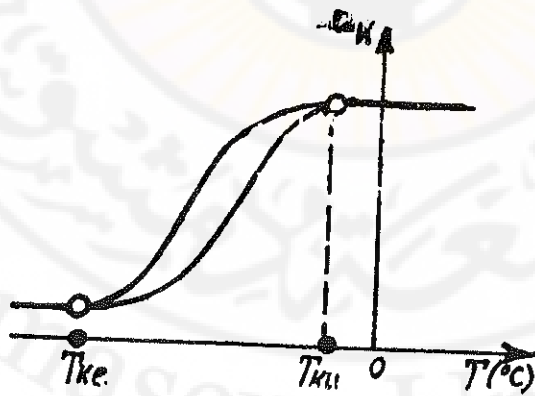
٣- اختبار مدى صلاحية المادة للاستعمال في صنع قطع الآلات أو عناصر الإنشاءات التي تعمل في درجات الحرارة المرتفعة أو السالبة . فلقد تبين أن قيم متانة الصدم تعد أساساً في عملية قبول أو رفض المادة التي ستستخدم في قطع الآلات أو عناصر الإنشاءات التي تتعرض لأحمال ديناميكية وتستغل في درجات حرارة معينة . فمثلاً يجب أن لا تقل متانة الصدم عن $(8 \div 10 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2)$



الشكل (٨ - ٤٠) : متانة الصدم للفولاذ الكربوني منخفض نسبة الكربون في درجات الحرارة المرتفعة والسالبة .

وذلك لجميع أنواع الفولاذ التي تستغل في درجة الحرارة العادية وتعرض **للتعرض** ديناميكية • أما عند ارتفاع درجة الحرارة الى مجال معين أو عند **الظواهر** الى مجال معين آخر فان بعض أنواع الفولاذ الكربوني (مثلا) تفقد **المرونة** أو كلياً •

ويبين الشكل (٨ - ٤٠) أن الفولاذ الكربوني منخفض نسبة الكربون يفقد جزءاً من لدونته في المجال الحراري ما بين (200 ÷ 550 °C) **سبب** انخفاض قيم متانة الصدم عنده ، وفي درجات الحرارة السالبة فان هذا الفولاذ يفقد لدونته بالتدريج كلما انخفضت درجة الحرارة حتى يصبح هشاً عند درجة حرارة معينة وتصبح قيم متانة الصدم منخفضة جداً (انظر الشكل ٨ - ٤١) • وعلى هذا الأساس فان الهدف من اختبارات الصدم في درجات الحرارة السالبة للسعادن والخلائط المعدنية ينحصر بصفة عامة في تحديد درجة الحرارة (T_{ku}) التي تبدأ عندها لدونة المعدن بالتناقص ودرجة أخرى (T_{ke}) تصل عندها اللدونة إلى الحد الأدنى وتصبح المادة هشة وتنكسر دون انفعال لدن يذكر (انظر الشكل ٨ - ٤١) • وتعد طريقة الكسر بالصدم هذه أفضل طرق الاختبار واسرعها لايجاد



الشكل (٨ - ٤١) : علاقة متانة الصدم بدرجة حرارة الاختبار

هاتين النقطتين ، حيث يصنع عدد من العينات المتماثلة من المادة وتبرد كل منها إلى درجة حرارة معينة وفي حوض خاص ثم ترفع وتصدم في آلة الصدم • والزمن الذي يستغرقه رفع العينة من حوض التبريد ووضعها على الحامل الخاص في الآلة وصدمها ، صغير بشكل لا يسمح بارتفاع يذكر في درجات حرارة العينة وهذه حسنة من حسنات هذه الطريقة تجعلها أصح من غيرها من الطرق في مثل هذه المجالات •

٨ - ٩ - اختبار التعب :

إن الاجهادات التي تتعرض لها قطع الآلات والانشاءات بمختلف أنواعها وأشكالها نادراً ما تكون مجرد إجهادات ستاتيكية بسيطة بل غالباً ما تكون هذه الاجهادات متغيرة أثناء العمل في النوع أو المقدار أو في كليهما معاً • وقد تبين أن بعض قطع الآلات المعرضة لإجهادات متغيرة المقدار غالباً ما تنكسر بعد فترة من العمل تتعلق بالحدود التي تتغير ضمنها هذه الاجهادات ، وعلى الرغم من كون أكبر هذه الاجهادات لا يتجاوز حد المرونة للمادة المصنوعة منها هذه القطع • ولقد سُميت هذه الظاهرة التعب •

إن أول من اهتم بظاهرة التعب العالم الألماني اوغست فولر A. Wöhler وكان ذلك في النصف الثاني من القرن الماضي عندما بدأ يلاحظ أن بعض محاور عجلات القاطرات والمصصة يعامل آمان كبير بالنسبة لمقاومتها للشد ، لا تلبث بعد فترة معينة من العمل أن تنكسرون أن تترك أثراً واضحاً للانفعال اللدن • وقد أثبت فولر من خلال العديد من التجارب التي أجراها على مواد مختلفة أن لكل مادة من المواد المستعملة في الانشاءات المعدنية حداً معيناً من الإجهادات المتغيرة أو الديناميكية تستطيع المادة تحمله وتحمل مادونه من الاجهادات دون أن تنكسر — أي دون أن تتعب ، وسمي هذا الاجهاد حد التعب أو حد الصمود لكونه

الحد الفاصل بين التعب والصمود ، فما دون هذا الحد من الاجهادات ،تستطيع المادة تحمله الى اللانهاية من عدد مرات التحميل أو الاجهاد ، وما فوق هذا الحد سوف يسبب للمادة تعباً وانكساراً وذلك بعد عددٍ من مرات التحميل يتعاق بمقدار الاجهاد .

والغاية الأساسية من اختبارات التعب هي من جهة معرفة حد الصمود للمادة المعنية ومن جهة أخرى معرفة عمر القطعة المصنوعة من هذه المادة فيما لو حملت باجهاد ما أكبر من حد الصمود ، وكل هذه القيم يتم الحصول عليها بسهولة بانشاء ما يسمى منحني فولر للمادة . لذلك فان الهدف الرئيس من اختبارات التعب غالباً ما يكون هو إنشاء هذا المنحني .

وقبل أن نبدأ بدراسة طريقة فولر وكيفية انشاء منحني فولر تجريبياً لا بد من التعرف على أنواع الاجهادات الترددية التي تؤدي عادة الى تعب المادة وأنواع الآلات التي تقوم بتوليد هذه الأنواع المختلفة من الاجهادات الترددية .

٨ - ٩ - ١ - الاجهادات الترددية :

تعريف الاجهادات الترددية على أنها الاجهادات الدورية التي تتبدل قيمها بين حد أعظمي وحد أصغري ، ويكون هذا التبدل إما منتظماً أو عشوائياً . ويوضح الشكل (٨ - ٤٢) المزايا الأساسية للاجهاد الترددي وذلك عندما يكون تغير هذا الاجهاد تغيراً منتظماً ، حيث يمكننا من هذا الشكل أن نستنتج معنى القيم التالية :

- σ_{max} - المقدار الجبري لأكبر اجهاد ترددي خلال دورة التحميل الواحدة .
- σ_{min} - المقدار الجبري لأصغر اجهاد ترددي خلال دورة التحميل الواحدة .
- σ_s - وهي نصف مجموع σ_{max} و σ_{min} ، حيث :

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (8.76)$$

• وتدعى القيمة الوسطى للاجهاد الترددي (أو إجهاد الشد الوسطي)

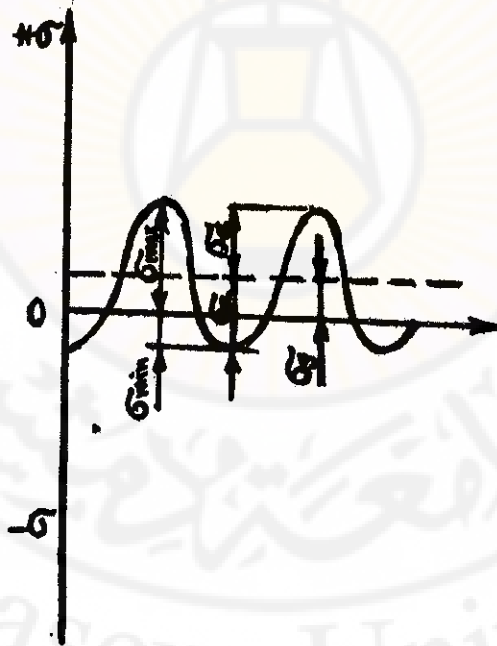
σ_a - وهي نصف الفرق بين $\sigma_{\max}$ و $\sigma_{\min}$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (8.77)$$

• وتسمى سعة الاجهاد الترددي

من هنا نستنتج أن :

$$\sigma_{\max} = \sigma_s + \sigma_a ; \quad \sigma_{\min} = \sigma_s - \sigma_a \quad (8.78)$$



الشكل (٨ - ٤٢) : مزايا الاجهاد الترددي الاساسية

R - وهي النسبة بين $\sigma_{\min}$ و $\sigma_{\max}$ ، حيث :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (8.79)$$

وتدعى بمعامل اللاتناسق لدورة التحميل . فعندما تكون ($R = -1$) فإن دورة التحميل متناسقة وعندها تكون (انظر الشكل ٨ - ٤٣ a) :

$$\sigma_a = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min} \quad (8.80)$$

$$\sigma_s = 0$$

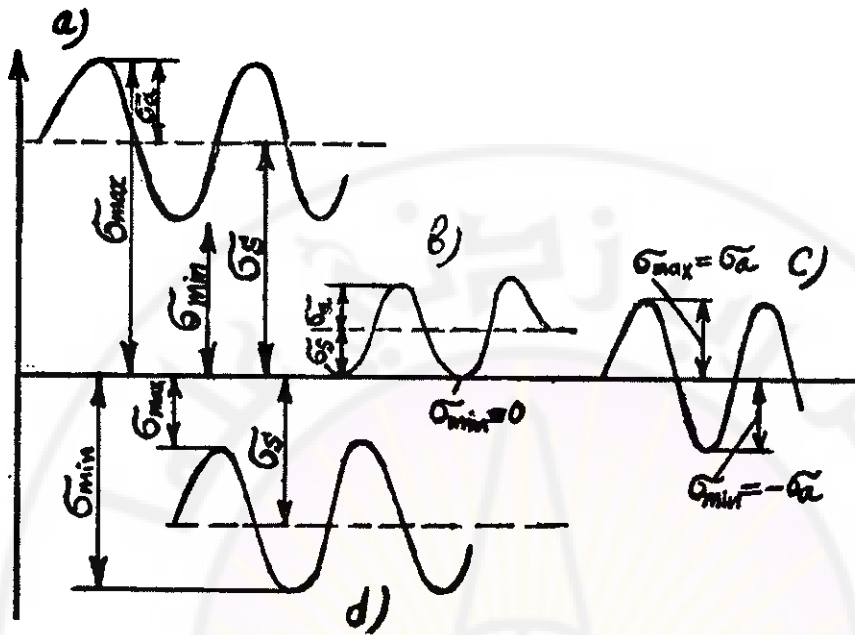
وهذا يعني أن دورة التحميل المتناسقة هي الدورة التي يكون فيها الاجهاد الأعظمي والأصغري متساويين بالقيمة المطلقة ولكنهما مختلفين بالاشارة .

وهناك حالة خاصة من حالات دورة التحميل اللاتناسقية تدعى بدورة التحميل النبضية وذلك عندما يكون الاجهاد الاصغري $\sigma_{\min}$ مساوياً الصفر وعندها يكون (انظر الشكل ٨ - ٤٣ b) :

$$\sigma_{\min} = 0 ; R = 0 ; \sigma_a = \sigma_s = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

تدعى دورات التحميل التي تتساوى فيها عوامل اللاتناسق بدورات التحميل المتشابهة ، وعندها فإن النسبة بين الاجهادات الاعظمية لهذه الدورات تساوي النسبة بين اجهاداتها الوسطى والنسبة بين ساعات اجهادها ، أي أن :

$$\frac{\sigma'_{\max}}{\sigma''_{\max}} = \frac{\sigma'_s}{\sigma''_s} = \frac{\sigma'_a}{\sigma''_a} \quad (8.81)$$



الشكل (٨ - ٤٣) : بعض أشكال دورات التحميل في اختبار التعب

- (a) دورة تحميل لاتناسقية تتضمن إجهاد شد وسطي .
- (b) دورة تحميل نبضية .
- (c) دورة تحميل متناسقة .
- (d) دورة تحميل لاتناسقية تتضمن إجهاد ضغط وسطي .

ومنه نجد أن :

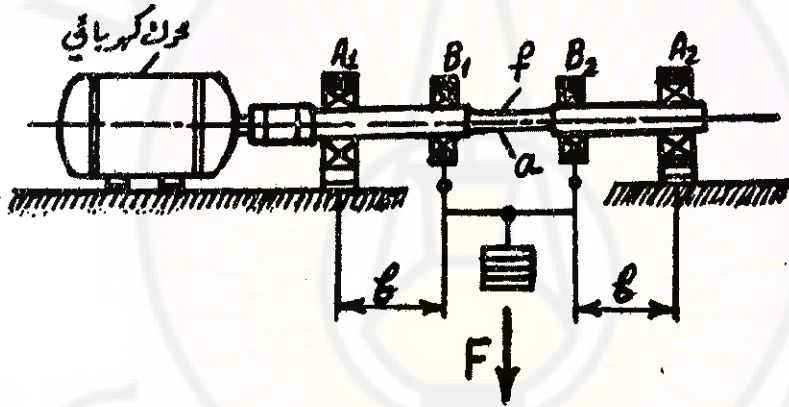
$$R' = \frac{\sigma'_{\min}}{\sigma'_{\max}} = \frac{\sigma'_{\max} - 2\sigma'_a}{\sigma'_{\max}} = 1 - 2 \frac{\sigma'_a}{\sigma'_{\max}}$$

$$= 1 - 2 \frac{\sigma''_a}{\sigma''_{\max}} = R'' \quad (8.82)$$

٨ - ٩ - ٢ - توليد الاجهادات الترددية (آلات اختبار التعب) :

إن آلات اختبار التعب كثيرة ومتنوعة ولكن أكثرها استعمالاً هي تلك الآلات التي تعمل بإحدى الطريقتين التاليتين :

الطريقة الاولى : وتسمى طريقة الانحناء الدوراني ، ويتم في هذه الطريقة تثبيت العينة أفقياً على آلة الاختبار من نهايتها وباستعمال محامل دحرجية وتحميلها عند منتصفها في نقطة أو نقطتين متساويتي البعد عن نقطتي التثبيت ، بثقل محمول على محامل دحرجية أيضاً (انظر الشكل ٨ - ٤٤) .



الشكل (٨ - ٤٤) : آلة اختبار على التعب بطريقة الانحناء الدوراني

وتدور العينة بمحرك كهربائي ، فيتولد في العينة عزم انحناء مقداره بين نقطتي

التحميل B_1 و B_2 :

$$M = b \cdot F \quad (8.83)$$

وتتولد في العينة اجهادات شد في نصفها السفلي واجهادات ضغط في نصفها العلوي ، وتكون القيمة العظمى لكل من هذين الاجهادين هي المؤثرة في المولدين

العلوي f والسفلي a وقيمة كل منهما :

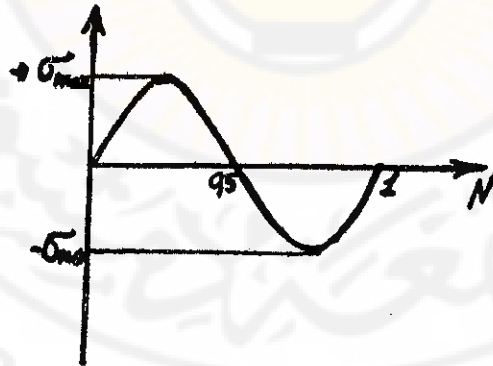
$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \quad (8.84)$$

وأثناء الدوران يكون تغير الاجهاد في كل مولد من مولدات سطح العينة الاسطوانية تغيراً جيئياً ، أي أن :

$$\sigma = \sigma_{\max} \cdot \sin 2 \pi N \quad (8.85)$$

ويُبيّن الشكل (٨ - ٤٥) تغير الاجهاد في المولد الجانبي للعينة والموجود مع محورها في مستوٍ أفقي واحد عندما تدور العينة دورة كاملة • وتشير الإشارة السالبة المبيّنة على الشكل إلى أن الاجهاد هو إجهاد ضغط •

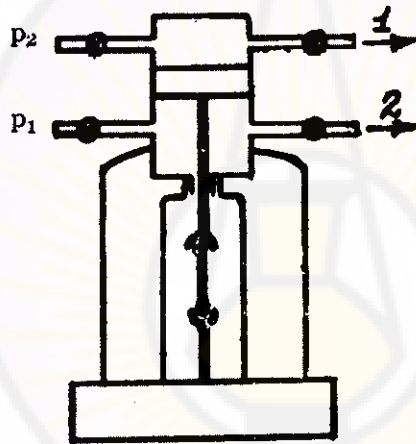
ويمكن اجراء الاختبار بتثبيت العينة من احدى نهايتها وتحميلها من نهايتها الأخرى بدلاً من تحميلها في وسطها وفي هذه الحالة يجب إعطاء العينة شكلاً خاصاً بحيث تكون محتوية على اختناق لجعل الاجهاد أعظمية عند ذلك الاختناق كيلا يتم الكسر عند نقطة التثبيت • وعدد الدورات في آلات الانحناء الدوراني



الشكل (٨ - ٤٥) : تغير الاجهاد في المولد الجانبي للعينة المختبرة بطريقة الانحناء الدوراني •

غالباً ما يكون بين ١٠٠٠ و ٣٠٠٠ دورة في الدقيقة (أي أن التردد الاعظمي الذي يمكن أن تدور به العينة هو ٥٠ هرتزاً) . وتتم مراقبة تردد العينة أثناء الاختبار بواسطة جهاز قياس تردد خاص يوصل مع المحرك الكهربائي .

الطريقة الثانية : وهي طريقة الشد والضغط بالاتجاه الطولي للعينة، والآلات المستعملة لهذه الغاية كثيرة ومتنوعة فمنها الكهربائية ومنها الهيدروليكية والتي تشبه إلى حد كبير آلة الشد العامة التي سبق التعرف عليها ، إلا أن المكبس الهيدروليكي في آلة الشد - ضغط هو مكبس ثنائي الاتجاه أي يضغط السائل في كل من نهايتي الاسطوانة بالتناوب . ويبيّن الشكل (٨ - ٤٦) مبدأ عمل



الشكل (٨ - ٤٦) : آلة هيدروليكية للاختبار على التعب بطريقة الشد - ضغط .

هذه الآلة ، حيث عندما يضغط السائل (الزيت) إلى القسم السفلي من الاسطوانة - أي تحت قرص المكبس وبضغط P_1 تكون القوة المؤثرة في العينة هي قوة شد ومقدارها :

$$F = p_1 \cdot A \quad (8.86)$$

حيث : A - مساحة سطح قرص المكبس .

وفي النصف الثاني من دورة التحميل الواحدة يُضغط السائل في القسم العلوي من الاسطوانة بضغط p_2 لتكون القوة المؤثرة في العينة هي قوة ضغط مقدارها $(p_2 \cdot A)$. ففي حال تساوي p_1 في النصف الأول من دورة التحميل مع p_2 في النصف الثاني يكون تغير الاجهاد في العينة بين نصفي دورة التحميل من σ_{max} إلى σ_{max} - تغيراً جيئياً على غرار ما رأيناه في الشكل (٨-٤٥) .

أما إذا جعلنا أحد الضغطين ثابتاً بشكل مستمر أثناء تغير الضغط الآخر فإن تغير الاجهاد سوف يبقى تغيراً جيئياً ولكن بين نهايتين عظمى σ_{max} وصغرى σ_{min} وكلتاهما ضمن مجال الشد أو الضغط (انظر الشكل ٨-٤٣) . وفي هذه الحالة يعد الاجهاد وكأنه مركب من اجهادين أحدهما ستاتيكي ثابت ومقداره σ_s ومركب عليه اجهاد ديناميكي جيئي سعة σ_a . ولقد تم استنباط العلاقات الرياضية لهذه الإجهادات في البند السابق .

على الرغم من الاستخدام الواسع لطريقتي الاختبار آتفتي الذكر على التعب ، إلا أن هناك مجموعة من العيوب والصعوبات في هاتين الطريقتين ، نذكر منها :

١- إن تردد التحميل للعينة أثناء الاختبار ذو قيم صغيرة نسبياً مما يستدعي قضاء أسابيع أحياناً لاختبار مجموعة من العينات وإنشاء منحني فولر (والذي سنتكلم عن طريقة إنشائه فيما بعد) .

٢- يجري اختبار التعب عادةً حتى حصول التصدع الكامل للعينة وانكسارها ويتم إنشاء منحني فولر على هذا الأساس ، إلا أن التصدع التعبي (وكما سترى فيما بعد) يتم عادةً على مرحلتين :

الأولى : ويتم فيها تراكم الاضرار مما يؤدي إلى ظهور التشقق الأولي .

الثانية : ويتم فيها نمو هذا التشقق ويستمر بالنمو حتى التصدع النهائي للعينة .

٣ - هناك صعوبة بالغة في كل من تحضير عينات نظامية وفق المواصفات المعروفة وفي تثبيت هذه العينات في آلات الاختبار آتفة الذكر لاختبارها على التعب .

ولتلافي بعض هذه الصعوبات والعيوب قمنا بإبتكار آلة اختبار على التعب* تعمل وفق نظام الاهتزاز الآلي ، حيث يتم اختبار عينات مختلفة الأشكال والأبعاد على هذه الآلة بطريقة الانحناء التوافقي (أو مايسمى عادةً بنظام الاهتزاز الطنيني Resonans) للعينة المختبرة . ولقد استخدمنا هذه الآلة في :

١ - اختبار عينات معدة وفق نماذج تشاربي وإيزود وعينات كبيرة ووصلات لحامية على التعب وإنشاء منحنيات فولر لها .

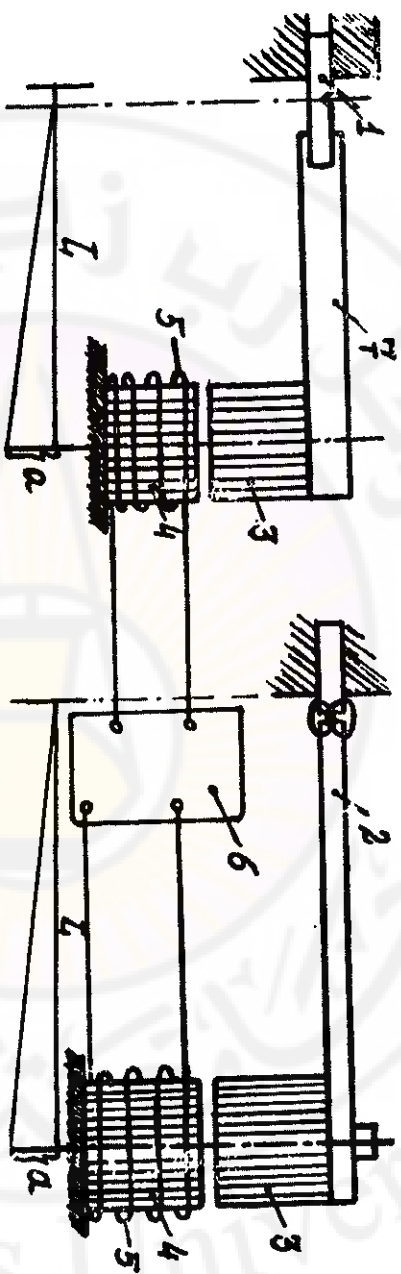
٢ - إنما شقوق تعبئة ذات أطوال محددة في عينات تشاربي وإيزود وذلك بهدف استخدام هذه العينات المحتوية على شقوق تعبئة فيما بعد في تحديد كل من متانة الصدم ومتانة التصدع لأنواع مختلفة من الفولاذ وفي درجات حرارة موجبة وسالبة .

ويُبين الشكل (٨ - ٤٧) المخططات المبسطة جداً لطريقة الاختبار هذه ولكل من عينات تشاربي وإيزود وللوصلات للحامية .

تتمتع هذه الطريقة بمجموعة من المزايا أهمها :

١ - تعمل آلة الاختبار وفق نظام الاهتزاز الآلي وتحافظ على اهتزاز

* - من اطروحة الدكتوراة للدكتور المهندس محمد علي سلامة - لينينغراد عام ١٩٨٢ .



الشكل (٨ - ٤٧) : مخططات تبين طريقة اختبار عينات تشاربي (أو إبرود) وعينات عبارة عن وصلات لحامية على النعيب وفق نظام الاهتزاز التوافقي .

- ١ - عينة تسلسلوي (أو إبرود) . ٢ - وصلة لحامية . ٣ - القلب الجلوي للمغناطيس . ٤ - القلب السفلي للمغناطيس . ٥ - وشيعة التحريض - الكهر ومغناطيسية . ٦ - آلة الاختبار وتشتمل الدارة الكبريائية (للتحكم بمقدار فرق الكمون في وشيعة التحريض) والدارات الالكترونية (للتحكم في اهتزاز العينة وفق نظام الاهتزاز الطيني (Resonans) . ٧ - ذراع فولاذي لقبض عينة الاختبار . ٨ - سرعة الاهتزاز - L الطول العملي لعينة الاختبار .

عينة الاختبار في حالة الطنين • من بداية الاختبار وحتى لحظة انكسارها وهذا يعني أن تردد اهتزاز القوة المحركة للعينة يكون متطابقاً طوال التجربة مع التردد الذاتي لهذه العينة والذي يتغير مع الزمن •

٢- إن أي تراكم للأضرار (كما سنرى فيما بعد) يمكن أن يؤدي إلى تصدع جزء من حبيبات معدن عينة الاختبار وهذا بدوره يؤثر في تردد الطنين للمجموعة المهتزة (المحتوية على عينة الاختبار) بشكل كامل • وتضمن هذه الآلة المبتكرة الكشف عن أصغر تغير متوقع في تردد الطنين للمجموعة المهتزة (حتى لو كانت قيمة هذا التغير في تردد الطنين مساوية ١٠ هرتز) •

٣- يتعلق تردد الطنين لأي مجموعة مهتزة بأبعاد عينة الاختبار التي تحتوي عليها هذه المجموعة ومدى الجساءة في تشيبتها • ويتغير هذا التردد عند ظهور التشقق وأثناء نموه ذلك لأن أبعاد المقطع العرضي للعينة تتغير ، ولهذا صُممت آلة الاختبار هذه لتعمل في مجال تردد واسع (من الصفر وحتى ٣٠٠ هرتز) وتبقى معافطة على نظام الاهتزاز الطنيني للمجموعة المهتزة بكاملها مهما كانت قيسة التردد •

أما مبدأ عمل آلة الاختبار فيمكن تلخيصه بما يلي:

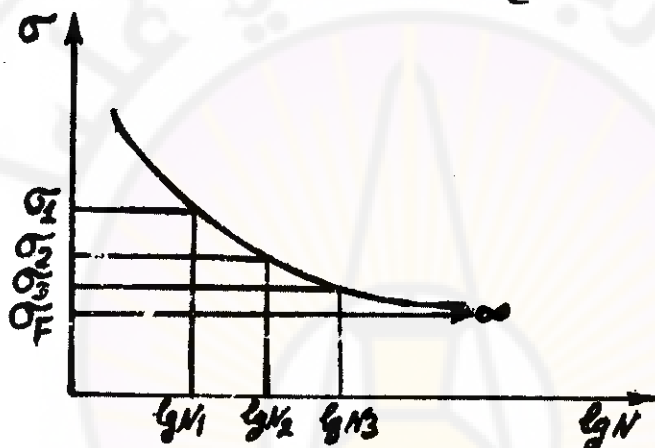
يسبب المغناطيس الكهربائي اهتزاز المجموعة التي تحتوي على عينة الاختبار، حيث يتم تحريض المغناطيس الكهربائي من دائرة كهربائية خاصة موجودة في الآلة وبمساعدة خلية ضوئية ذات حساسية عالية مهمتها اقتفاء وضع المجموعة المهتزة وإعطاء نبضة في اللحظة الزمنية المناسبة وذلك بغية المحافظة على طاقة اهتزاز الطنين • أما التحكم بكل من سعة اهتزاز المجموعة وزمن نبضة التيار الكهربائي المار عبر المغناطيس الكهربائي فيتم من خلال التحكم بكل من سعة مجموعة من المكثفات وفرق كمون شحنتها • ويمكن مراقبة تردد الاهتزاز الطنيني

للمجموعة باستخدام جهاز قياس التردد ، أما عدد دورات التحميل فتقاس
بوساطة عداد رقمي إلكتروني •

٨-٩-٢ - طريقة إنشاء منحني فولر :

يستخدم لإنشاء منحني فولر التجريبي عدد يتراوح بين ٦ و ١٠ عينات
من العينات التي تختلف أشكالها وأبعادها باختلاف طريقة الاختبار المستخدمة،
وتحمل كل منها بأحمال ترددية بحيث يكون الاجهاد الترددي على العينة الاولى
مساوياً : $\sigma_1 = 0,7 \sigma_y$ (حيث : σ_y حد الانسياب للمعدن المراد اختباره
على التعب) • ويتم تسجيل عدد مرات التحميل N_1 حتى لحظة ظهور التشقق
التعبى في العينة أو حتى لحظة انكسارها وذلك طبقاً لطريقة الاختبار المتبعة،
ثم تحمل العينة الثانية بإجهاد أقل من السابق ويسجل عدد مرات التحميل
 N_2 . ويستمر إنقاص الاجهاد مع العينات التالية حتى آخر عينة من المجموعة،
وتختار خطوات انقاص الاجهاد على العينات المتتالية بحيث تبقى العينة الأخيرة
على الأقل سليمة - أي بحيث تصمد إزاء الاجهادات المعرضة لها • ثم يرسم مخطط
بياني يؤخذ على محوره الشاقولي الاجهاد، وعلى محوره الأفقي عدد مرات التحميل
والتي تؤخذ عادةً بخطوات لوغاريتمية نظراً لكبر الأرقام التي قد نحصل عليها، وتسجل
على المخطط النقاط التي يتم عندها ظهور التشقق التعبى (أو انكسار) كل من العينات
المختبرة كما في الشكل (٨ - ٤٨) ، وبالوصل بين تلك النقاط نحصل على منحنى
فولر • ويلاحظ أن هذا المنحنى يكون شديد الانحدار في بدايته ثم يقل انحداره
حتى يتناهى الى خط أفقي • والخط الأفقي هذا هو حد الصمود للمادة ،
ويقترّب المنحنى من الخط الأفقي تقريباً عند $N = 2 \cdot 10^6$ لأكثر المعادن والخلائط
الفولاذية ، لذلك يمد أكبر اجهاد يمكن أن تتحملة القطعة مليوني مرة دون
أن يظهر بها تشقق تعبى (أو تنكسر) هو حد الصمود لمادة هذه القطعة •

ومنحني فولر هذا كبير الفائدة حيث يساعد من جهة على معرفة حد الصمود للمادة المعنية ومن جهة أخرى في معرفة عمر القطعة المعرضة لاجهادات ترددية معروفة القيمة ، أو بالأحرى في تصميم قطعة ما لتعيش عمراً معيناً أي لتحمل عدداً معيناً من دورات التحميل ، عندئذ تؤخذ قيمة $\lg N$ على المحور الأفقي ويرفع منها شاقول حتى يتقاطع مع المنحني ، ومن تلك النقطة نرسم خطاً أفقياً فنحصل على قيمة الإجهاد المسموح به •



الشكل (٨ - ٤٨) منحني فولر

وجرت العادة على أن يبسط شكل منحني فولر، حيث يرسم الجزء الأول منه على شكل مستقيم مائل يحدد ميله بمعرفة تقطعتين منه والجزء الثاني على شكل مستقيم أفقي بحيث تكون نقطة تقاطعهما عند $N = 2 \cdot 10^6$ ولتكن معادلة الخط المائل في هذه الحالة كما يلي :

$$\sigma_a + K \lg N = \sigma_F + K \lg N_0 \quad (8.87)$$

حيث : σ_F - حد الصمود •

N_0 - عدد مرات التحميل المطابقة لنقطة تقاطع المستقيمين المائل والمائل الأفقي

• (أي أن : $N_0 = 2 \cdot 10^6$)

σ_a - الإجهاد الترددي لنقطة ما على المخطط

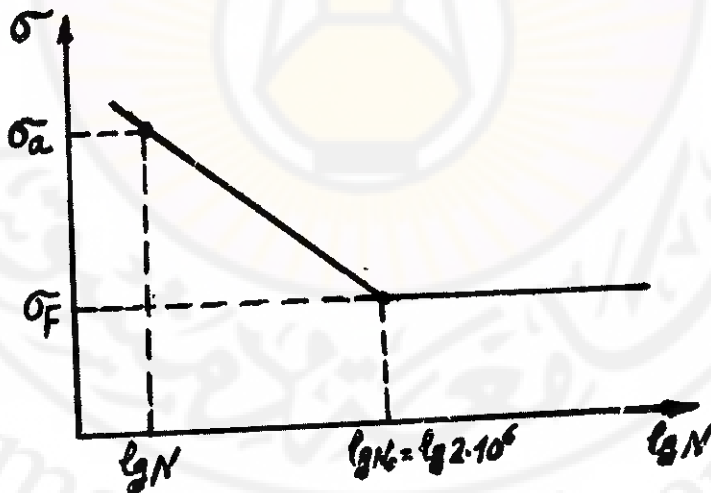
N - عدد مرات التحميل الموافقة للإجهاد σ_a

K - معامل يحدد ميل المستقيم على الأفق

غالباً ما يكون مطلوباً هو تحديد ميل هذا المستقيم وذلك بغية رسمه وعندها يمكننا من العلاقة (8.87) أن نجد أن ميل المستقيم يحدد بالعلاقة التالية :

$$K = \frac{\sigma_a - \sigma_F}{\lg N_0 - \lg N} \quad (8.88)$$

ولا بد أن ننوه هنا إلى أن الخط المائل على الشكل (٨ - ٤٩) يمثل منحنى العمر ، بينما يمثل الخط الأفقي حد التعب أو حد الصمود للمادة المختبرة .



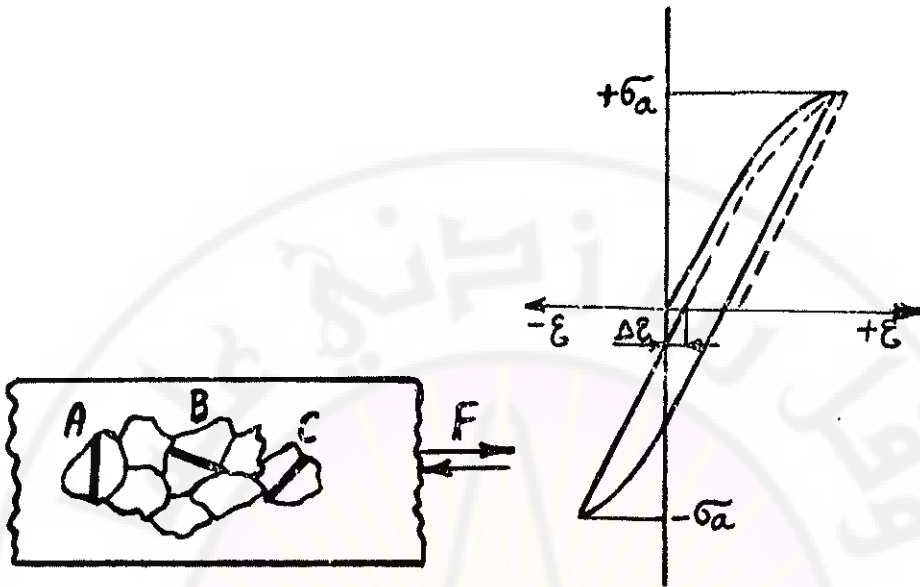
الشكل (٨ - ٤٩) : منحنى فولر المبسط

٨ - ٩ - ٤ - ميكانيزم التعب :

نحن نعلم من خلال دراستنا لعلم مقاومة المواد أن حد المرونة هو أكبر إجهاد يبقى الانفعال عنده انفعالا مرنا ، ويعمد هذا الحد (تجاوزاً ومن أجل السهولة) مساوياً حد الانسياب ، غير أن حد المرونة الفعلي للمادة وبخاصة المقيس على عينة وحيدة البلورة يكون أخفض بكثير من حد الانسياب ، والتعب لا يمكن أن يحدث طالما بقيت الاجهادات الترددية واقعة ضمن المجال المرن للمادة ، أي أن حد التعب حتماً يجب أن يكون أكبر من حد المرونة للمادة ، إذ أنه حتى يتم ظهور التشقق التعبى في مادة ما أو عينة ما يجب أن تستهلك كمية من القدرة تصرفها على تغيير شكلها سواء أكان هذا التغيير في الشكل قابلاً للقياس (في اختبار الشد) أم غير محسوس (في اختبار التعب) . فعند تحميل العينة باجهاد شد - ضغط متكرر بين القيمتين σ_a و $\sigma_a -$ بحيث تكون σ_a أكبر من حد المرونة ولكن أصغر من حد الانسياب لمادة العينة ، فإن كل دورة تحميل سوف تترك في بعض بلورات العينة انفعالاً لدناً مقداره $\Delta \epsilon$ (انظر الشكل ٨ - ٥٠) .

وبتكرار دورات التحميل تتراكم هذه الانفعالات حتى تؤدي في النهاية الى تصدع هذه البلورات .

ولكي يزداد هذا الامر وضوحاً ، نفترض أن العينة مصنوعة من مادة بلوراتها ذات مستوي انزلاق وحيد ، ولنختار من بين بلورات هذه العينة البلورات A و B و C (انظر الشكل ٨ - ٥١) ، حيث مستوي الانزلاق في البلورة A عمودي على اتجاه القوة ومستوي انزلاق البلورة B يسيل بزاوية كيفية على هذا الاتجاه بينما يشكل مستوي انزلاق البلورة C زاوية مقدارها 45° مع اتجاه القوة المطبقة . فعند تطبيق القوة سوف تتولد في البلورات إجهادات قص أو انزلاق



الشكل (٨ - ٥٠) : تراكم الانفعالات
اللدنة في الميمنة المختبرة على التعب
بعد كل دورة تحميل .

الشكل (٨ - ٥١) : التباين في
مدى تأثير البلورات باجهادات انقاص
طبقاً لتباين اتجاهات مستويات انزلاق
هذه البلورات .

تكون أعظمية في مستوى انزلاق البلورة C ومعدومة تقريباً في مستوى انزلاق A ، الأمر الذي يؤدي إلى انزلاق أجزاء البلورة C على بعضها بعضاً ، وبتكرار التحميل يتكرر الانزلاق وتزداد قساوة هذه البلورة بفعل الانزلاق اللدن ولكن لا تزال في الوضع المناسب لتكرار الانزلاق الذي يستمر حتى تستنفذ للبلورة C قابليتها لتشكيل اللدن فتتصدع ، وبتصدعها يزداد معدل الاجهادات في البلورات الباقية - أي يزداد إجهاد القص في البلورة B الى حد يستطيع معه جعل هذه البلورة تنهج نهج سابقتها مما يؤدي بالنتيجة إلى تصدعها ، وعندئذ تكبر الاجهادات إلى حد لا تستطیع البلورات المشابهة في وضعها للبلورة A من تحملها فتتصدع القطعة بكامل مقطعها . إن انزلاق البلورة C

وتصدعها يتعلق الى حد كبير بنوعية البلورات المحيطة بها ومدى مقاومة هذه البلورات للانزلاق الحاصل ، أي أن البلورة C لا تستطيع الانزلاق والتصدع بحرية تامة إلا إذا كانت واقعة على سطح العينة ، لذلك فإن أي تصدع سواء أكان تعبياً وغير ذلك يبدأ دائماً من سطح العينة ويمتد باتجاه الداخل .

من خلال النموذج المبسط السابق نستطيع افتراض التصدع التعبي يتم على مرحلتين رئيسيتين :

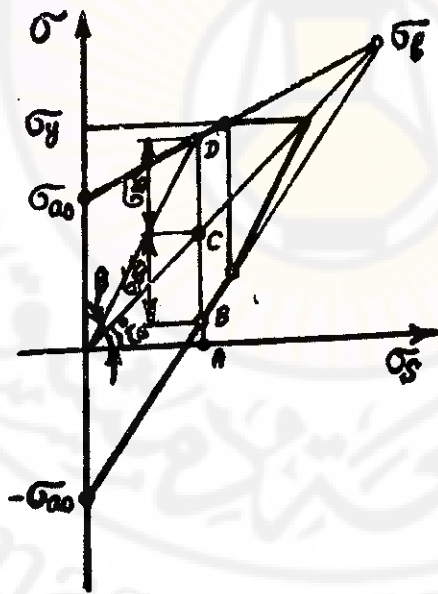
١ - مرحلة وجود تشققات ميكروية صغيرة جداً في بلورات المعدن الأكثر إجهاداً واتحاد هذه التشققات الميكروية في تشقق ماكروي له طول معين (لا يتجاوز طوله ١ مم) يبدأ من سطح العينة (أو من نقاط تركيز الاجهادات) وبهذا الشكل تنتهي المرحلة الاولى وهي مرحلة ظهور التشقق التعبي .

٢ - مرحلة نمو هذا التشقق واستمراره بالنمو إلى حد يصبح معه مقطع العينة الباقي غير قادر على تحمل الاجهادات الترددية مما يؤدي الى تصدع المعدن بكامله .

٨ - ٩ - ٥ - مخطط الاجهادات الحدية (مخطط سميث) :

إن حد الصمود (أو حد التعب) لكل مادة من مواد الانشاءات المعدنية يمكن أن يأخذ قيمة كثيرة ومختلفة وذلك حسب طبيعة الاجهادات أو بالأحرى حسب مقدار الاجهاد الستاتيكي المركب على الاجهاد الديناميكي . ولا يعبر عن حد الصمود بقيمة واحدة إلا عندما يكون الاجهاد اجهاداً ديناميكياً مطلقاً أي عندما تكون قيم σ_s مساوية الصفر ، ويصبح الاجهاد الديناميكي من النوع المسمى الاجهاد المتماثل (أي أن : $R = -1$ كما يئنا آنفاً) . لهذا كان لا بد من إنشاء مخطط يبين القيم المختلفة لحد الصمود باختلاف قيم الاجهادات الستاتيكية المركبة على

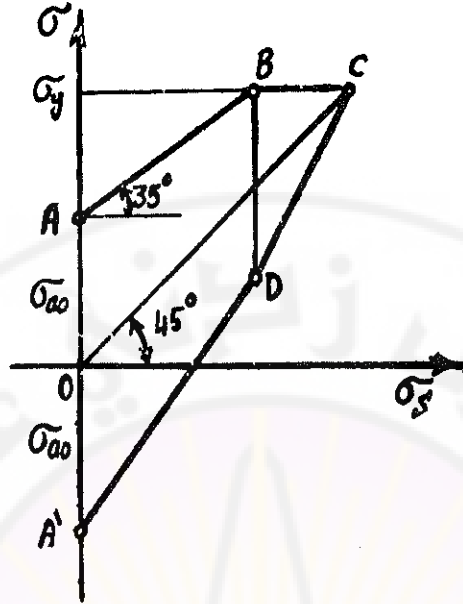
الاجهادات الديناميكية للاستفادة منها عند التصميم . وقد ابتكرت عدة طرق لإنشاء مخططات من هذا النوع كانت أهمها وأكثرها استعمالاً طريقة سميث Smith المبيّنة على الشكل (٨ - ٥٢) ، حيث تؤخذ على محور الاحداثيات الافقي σ_s وعلى الشاقولي σ_{max} و σ_{min} ثم يرسم من مركز الاحداثيات مستقيم بزاوية ميل 45° على كلٍ من المحورين . وبعد اجراء عدد من الاختبارات لتحديد حد الصمود عند قيم مختلفة للإجهاد الستاتيكي σ_s ، تؤخذ قيمة σ_s (لكل اختبار على حدة) على المحور الافقي (النقطة A) ثم يرفع منها عمود إلى المستقيم المائل ، ومن نقطة تقاطعه معه (C) يؤخذ إلى الأعلى وإلى الأسفل طول "يعادل قيمة σ_a التابعة لـ σ_s المعنية ، فنحصل على النقطتين B و D اللتين تمثلان الاجهادات الحدية لدورة التحميل σ_{max} و σ_{min} بالترتيب .



الشكل، (٨ - ٥٢) : مخطط الإجهادات الحدية (مخطط سميث) .

وبوصل النقاط التي تشير الى قيم σ_{max} للاختبارات أو بالاحرى العينات المختلفة مع بعضها من جهة والنقاط الدالة على قيم σ_{min} مع بعضها من جهة أخرى نحصل على المخطط المغلق المسى مخطط سيث ، ومن البدهي أن يلتقي الخطان الواصلان بين قيم الاجهادات العظمى والصغرى عند قيمة σ_b أي عند حد الاجهاد الاعظمي للمعدن وعندما تكون ($R = 1$) . ولقد جرت العادة أن يقطع المخطط بخط أفقي عند قيمة σ_y (أي عند حد الانسياب) ذلك لان تجاوز قيمة σ_{max} لهذا الحد ليس له أي قيمة من الناحية العملية وكذلك تقطع قيم σ_{min} بما يتناسب مع الخط الأفقي السابق .

ولتسهيل عملية إنشاء مخطط سيث فقد اقترح اتحاد المهندسين الألمان VDI استعمال الطريقة التقريبية التالية : تجري اختبارات لتحديد حد الصمود بجعل الاجهادات اجهادات ديناميكية فقط أي إجهادات متماثلة ، وتؤخذ قيمة σ_a على المحور الشاقولي بكل من الاتجاهين (انظر الشكل ٨ - ٥٣) فنحصل على النقطتين : A بالاتجاه الموجب (الشد) و A' بالاتجاه السالب (الضغط) ، ونرسم من النقطة A مستقيماً يميل على الافق بزاوية قدرها ٣٥° ومن مركز الاحداثيات المستقيم المائل بزاوية ٤٥° ثم نرسم من النقطة المشكلة لقيمة σ_y على المحور الشاقولي مستقيماً أفقياً يقطع المستقيمين السابقين في النقطتين B و C وبايجادنا للنقطة D نظيرة النقطة B شاقولياً بالنسبة للمستقيم النصف والوصل بين النقاط A B C D A' نحصل على شكل تقريبي لمخطط سيث يمكن أن نفي بالغرض ولو أنه أقل دقة من المخطط المرسوم بالطريقة السابقة . ونود أن ننوه هنا إلى أن أي مستقيم يمر عبر نقطة تقاطع محاور الاحداثيات لمخطط



الشكل (٨ - ٥٣) : مخطط سميث التقريبي وفق اقتراح اتحاد المهندسين الألماني .

سميث (انظر الشكل ٨ - ٥٢) يعد المحل الهندسي للنقاط التي تميز دورات التحميل المتشابهة أي التي تتساوى فيها عوامل الالتناسق $(r - \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}})$ ، حيث نستنتج من الشكل :

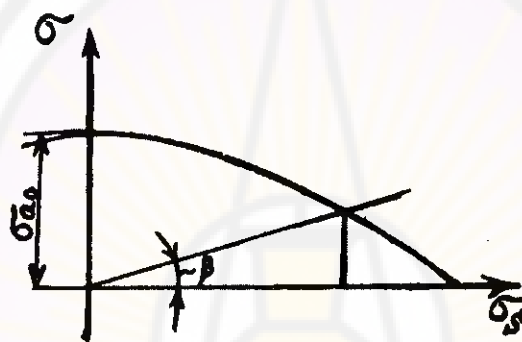
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_s} = \frac{2 \sigma_{\max}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \frac{2}{1 + r} \quad (8.89)$$

وعلى هذا الاساس توجد في الوقت الحاضر مجموعة من الطرق أبسط من الطرق السابقة لرسم مخطط الاجهادات الحدية ، نذكر منها الطريقة التالية : يؤخذ على المحور الأفقي كالعادة الاجهاد الستاتيكي σ_s ، أما على المحور الشاقولي

فتحمل قيم السعة الحدية σ_a لدورة التحميل (الشكل ٨ - ٥٤) •

وعلى هذا المخطط نلاحظ أيضاً أن أي مستقيم ينطلق من نقطة تقاطع محاور الاحداثيات بزاوية معينة يميز أيضاً دورات التحميل التي تتساوى فيها عوامل اللاتناسق ، ذلك لأن :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_s} = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2}{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2} = \frac{1 - r}{1 + r} \quad (8.90)$$



الشكل (٨ - ٥٤) : أحد مخططات الاجهادات الحدية المبسط .

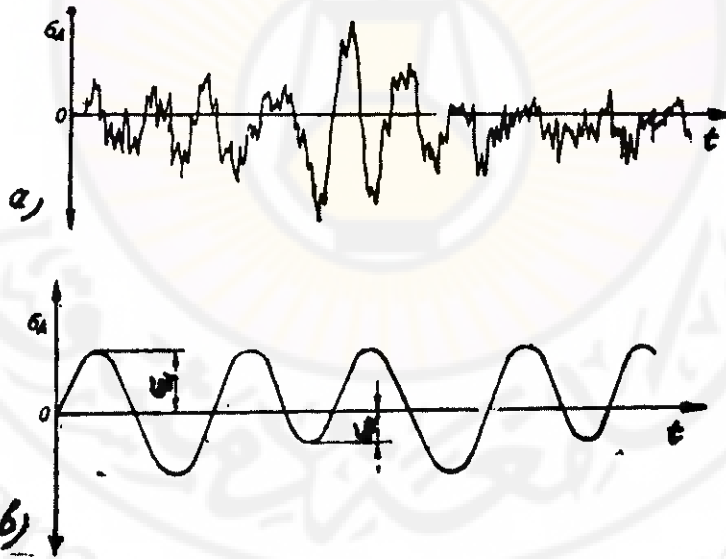
٨-٩-٦ - الطرق المختصرة لإنشاء منحنى فولر :

سبق أن ذكرنا أن اختبار التعب غالباً ما تكون غايته هي إيجاد منحنى فولر للمادة موضوع الاختبار • وإيجاد هذا المنحنى بطريقة فولر نفسها يحتاج إلى اختبار عددٍ من العينات وفي مستويات اجهادية مختلفة ، وهذا بدوره يحتاج الى فترة زمنية ليست بالقصيرة ، بخاصة إذا لم يكن متوافراً سوى آلة اختبار واحدة . لذلك فقد ظهر في السنوات الاخيرة عدد من الطرق التقريبية المختصرة والتي تمكن من إنشاء منحنى فولر التقريبي أو المبسط من إجراء الاختبار على عينة

واحدة فقط، وكل هذه الطرق تستند إلى نظرية بالمجرين وماينر (Palmagren - Miner)
والمسماة نظرية تراكم الأضرار .

٨-٩-٦-١ - نظرية بالمجرين وماينر :

كثيراً ما يصادف في الحياة العملية أن الاجهادات المتغيرة مع الزمن لا يكون
تغيرها جيبياً بسيطاً وانما غالباً ما تكون سعة هذه الاجهادات متغيرة باستمرار،
فمثلاً الاجهادات المؤثرة في محاور العجلات في سيارة ركوب عادية ، لا يمكن أن
يكون تغيرها تغيراً جيبياً إلا إذا كان الحمل والسرعة ثابتين ، والطريق مستوية
كلوح الزجاج أما عملياً فان سعة هذه الاجهادات متغيرة باستمرار مع استمرار تغير
العوامل المذكورة ، والمخطط البياني لتغير هذه الاجهادات مع الزمن سوف يكون
أقرب إلى ما هو مبين في الشكل (٨ - ٥٥) منه الى التغير الجيبي البسيط .



الشكل (٨ - ٥٥) : التغير الحقيقي والتقريبي للاجهادات (المؤثرة على محاور
العجلات في سيارة ركوب عادية) مع الزمن .

ومن أجل التبسيط لنفرض أن سعة هذه الإجهادات تقتصر على التغير بين قيمتين σ_{a_1} و σ_{a_2} (انظر الشكل ٨ - ٥٥ b) عندئذ يمكن تحديد عدد الدورات أو عدد مرات التحميل التي تسبب الكسر حسب نظرية تراكم الضرر على النحو التالي :

لنفرض أن عدد مرات التحميل التي تسبب الكسر عند الاجهاد σ_{a_1} هو N_1 وعند σ_{a_2} هو N_2 ، ففي كل مرة من مرات التحميل هناك مقدار من العمل يستهلك في التشكيل اللدن للقطعة أو العينة كما سبق أن ذكرنا (البند ٨-٩-٣ من هذا الفصل) ، وعندما يتم الكسر بعد N مرة من مرات التحميل ، فهذا يعني أن العمل اللازم للكسر W يكون قد استهلك خلال هذه الـ N من المرات ، أي أن مقدار العمل المستهلك خلال N_1 من مرات التحميل عند σ_{a_1} ، هو مقدار العمل المستهلك نفسه خلال N_2 من مرات التحميل عند σ_{a_2} . فلو حملنا القطعة بالاجهاد σ_{a_1} لعدد محدود من المرات n_1 فسوف تستهلك خلال ذلك مقدارا من العمل قيمته $\frac{W \cdot n_1}{N_1}$ ، ولو حملنا القطعة بعد ذلك بالاجهاد σ_{a_2} ولعدد من المرات n_2 ، لكان مقدار العمل المستهلك خلال هذه المرحلة هو $\frac{W \cdot n_2}{N_2}$. فنظرية تراكم الاضرار تقول : إن الكسر سوف يحدث عندما يصبح مجموع الاعمال الجزئية المستهلكة خلال مراحل (مرحلتين) التحميل المختلفة مساويا لعمل الكلي اللازم للكسر ، أي حسب مثالنا هذا سوف تنكسر القطعة (أو المحور) عندما يصبح :

$$\frac{W \cdot n_1}{N_1} + \frac{W \cdot n_2}{N_2} = W \quad (8.91)$$

أي عندما يصبح :

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \quad (8.92)$$

وبالطريقة نفسها يمكن البرهان على أنه لو تم التحميل بأجهادات ترددية ذات سمات مختلفة وعددها m فإن الكسر سوف يحدث عندما يُستهلك العمل الكلي اللازم لحدوث الكسر - أي عندما يصبح :

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_m}{N_m} = 1 \quad (8.93)$$

والطرق المختصرة التي استندت إلى هذه النظرية متعددة كما ذكرنا ، ولكن أبسطها وأسهلها تنفيذاً هي الطريقة المسماة طريقة لوكاتي (Locati) ، وسنكتفي في هذا المجال بالتعرف على هذه الطريقة .

٨-٩-٦-٢ - طريقة لوكاتي :

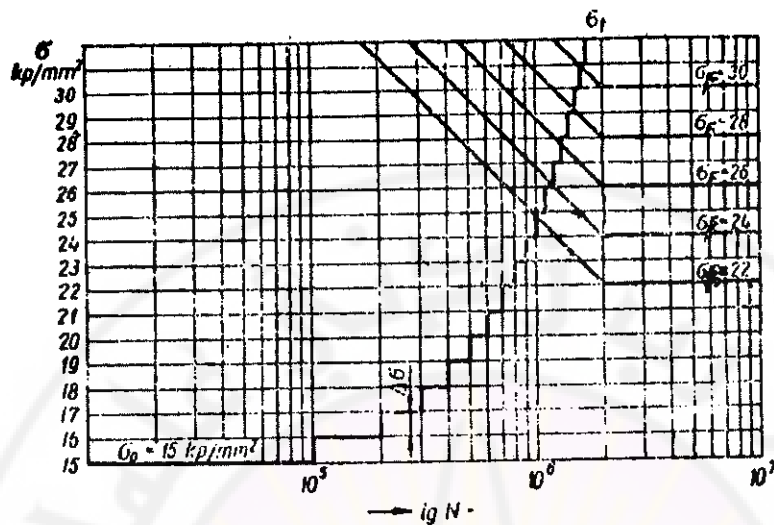
في هذه الطريقة تقدر مسبقاً قيمة حد الصمود المتوقع عليه بشكل تقريبي لمادة العينة المراد اختبارها ، ثم يرسم عدد من منحنيات فولر المبسطة (لا يقل عن ثلاثة منحنيات) بحيث يعطي بعضها حدود صمود أعلى وبعضها الآخر حدود صمود أخفض من حد الصمود المتوقع ، ثم يبدأ بتحميل العينة بأجهاد ترددي σ_0 سعته منخفضة بالنسبة لحد الصمود المتوقع ويستمر بالتحميل لعدد معين من المرات n ، وبعدئذ يرفع مستوى الأجهاد بمقدار $\Delta \sigma$ إلى σ_1 وتحمل العينة من جديد n مرة ، ويستمر برفع الأجهاد بالمقدار نفسه $\Delta \sigma$ والتحميل بالعدد نفسه من المرات n عند كل إجهاد جديد حتى تنكسر العينة عندئذ تحسب قيمة $\sum \frac{n}{N}$ حسب كل من منحنيات فولر التقريبية المرسومة

مسبقاً على حدة ، فيكون الناتج قيمةً مختلفة لهذا المجموع ، وسوف يكون بعضياً أصغر وبعضها الآخر أكبر من الواحد ، وبرسم هذه القيم في مخطط بياني تؤخذ على محوره الأفقي قيم $\sum \frac{n}{N}$ وعلى محوره الشاقولي σ_F . فمن هذا المخطط وبطريقة التقريب الداخلي (interpolation) يمكن إيجاد حد الصمود الحقيقي للمادة .

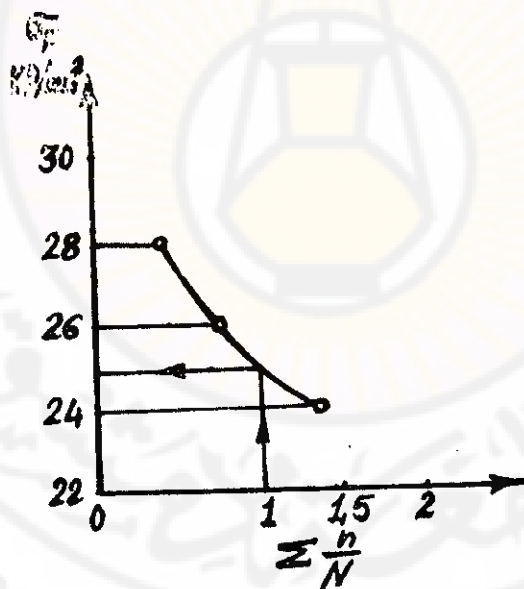
ولزيادة توضيح هذه الطريقة لنفرض انه لدينا عينة من الفولاذ C35 والذي حد صموده تقريباً نحو ٢٥ كيلو بوندا/مم^٢ . نرسم ثلاثة منحنيات فولر مبسطة بحيث تتراوح حدود صمودها بين قيمتين احدهما أخفض والاخرى أعلى من حد الصمود التقريبي السابق ، فنرسم المنحني الاول بحيث يعطي حد صمود $\sigma_F = 24$ والثاني $\sigma_F = 26$ ، والثالث $\sigma_F = 28 \text{ KP/mm}^2$. نبدأ بتحميل العينة باجهاد أولي سعته ١٥ كيلو بوندا/مم^٢ ولعدد من المرات مقداره $n = 10^5$ ، ثم نرفع سعة الاجهاد بمقدار $\Delta \sigma = 1 \text{ KP/mm}^2$ إلى σ_1 ونحمل بعدد المرات n نفسها ، ثم نرفع الاجهاد من جديد بالمقدار نفسه $\Delta \sigma$ إلى σ_2 ونحمل أيضاً بعدد المرات n نفسها (يفضل أن يكون كل من $\Delta \sigma$ و n ثابتاً لتسهيل عملية تقويم النتائج) ونستمر بهذه الخطوات حتى تكسر العينة (انظر الشكل ٨-٥٦) . بعدئذ نحسب $\sum \frac{n}{N}$ لكل من المنحنيات الثلاثة على حدة فنحصل على القيم التالية :

$$\sum \frac{n}{N_{28}} = 0,4 \quad , \quad \sum \frac{n}{N_{26}} = 0,74 \quad , \quad \sum \frac{n}{N_{24}} = 1,37$$

وطريقة حساب هذه القيم يُبينها الجدول رقم (٨ - ٤) . وبرسم هذه القيم الثلاث في مخطط بياني $\sigma_F - \sum \frac{n}{N}$ (انظر الشكل ٨ - ٥٧) نستطيع إيجاد



الشكل (٨ - ٥٦) : تعيين حد الصمود للمادة باختبار عينة واحدة (طريقة نوكتي) .



(الشكل ٨ - ٥٧) : إيجاد حد الصمود طبقاً لنظرية تراكم الأضرار .

الجدول (٨ - ٤) : تقويم نتائج طريقة لوكاتي

kp/mm ²	n · 10 ⁻⁵	$\sigma_F = 24$		$\sigma_F = 26$		$\sigma_F = 28$	
		N · 10 ⁻⁵	n	N · 10 ⁻⁵	n	N · 10 ⁻⁵	n
			N		N		N
15	1	∞	0	∞	0	∞	0
16	1	∞	0	∞	0	∞	0
17	1	∞	0	∞	0	∞	0
18	1	∞	0	∞	0	∞	0
19	1	∞	0	∞	0	∞	0
20	1	∞	0	∞	0	∞	0
21	1	∞	0	∞	0	∞	0
22	1	∞	0	∞	0	∞	0
23	1	∞	0	∞	0	∞	0
24	1	20	0,05	∞	0	∞	0
25	1	15,5	0,07	∞	0	∞	0
26	1	12	0,08	20	0,05	∞	0
27	1	9,4	0,11	15,5	0,07	∞	0
28	1	7,4	0,14	12	0,08	20	0,05
29	1	5,8	0,17	9,4	0,11	15,5	0,07
30	1	4,5	0,22	7,4	0,14	12	0,08
31	1	3,5	0,29	5,8	0,17	9,4	0,11
32	0,64	2,7	0,24	4,5	0,14	7,4	0,9
	$\Sigma \frac{n}{N}$		1,37		0,76		0,40

حد الصمود الحقيقي بياناً ، والذي نرى من الشكل أن قيمته $\sigma_F = 24,9 \text{ KP/mm}^2$

بافتراض أن منحني فولر المتضمن لحد الصمود الحقيقي هو الذي يجب أن يعطي

$$\Sigma \frac{n}{N} = 1 \text{ حسب نظرية تراكم الاضرار .}$$

٨ - ٩ - ٧ ... تأثير العوامل التكنولوجية والتصميمية في قيم حدالصمود للمادة:

بيئنا آتفاً أن مزايا الاجهاد الترددي (أي مقدار الاجهاد الستاتيكي المركب على الاجهاد الديناميكي) تؤثر في قيم حد الصمود الناتجة وللسادة المختبرة نفسها . ولكن هناك مجموعة كبيرة من العوامل التي تؤثر أيضاً في قيم حدالصمود هذه ، نذكر منها :

- ١ - تركيز الاجهادات (أي وجود ثقب أو حزوز أو أي تغيرات مفاجئة في المقطع العرضي لعينة الاختبار) .
- ٢ - الأبعاد المطلقة للمقطع العرضي لعينات الاختبار (عامل الأبعاد) .
- ٣ - نوع الوسط الذي يتم به الاختبار .
- ٤ - درجة حرارة الاختبار .
- ٥ - نظام التحميل المستخدم وتردده .

ولبيان مدى تأثير أي من العوامل آتفة الذكر (أو أكثر من عامل) في قيم حد الصمود لمادة ما يتم في البداية اختبار مجموعة من العينات ذات سطوح مصقولة تماماً وفي درجة الحرارة العادية شريطة أن يتم الاختبار بدورات تحميل متماثلة ($\sigma_s = 0$) ويعين حد الصمود للسادة ، ويرمز له بالرمز (σ_{-1}) . ثم تؤخذ مجموعة أخرى من العينات ومن المادة نفسها ولكن بتوافر عامل (أو أكثر) من العوامل السابقة يتم الاختبار وبدورات تحميل متماثلة أيضاً ويعين حدالصمود للمادة ، ويرمز له في هذه الحالة (σ_{-1k}) .

وتتوفر في الوقت الحاضر مجموعة كبيرة جداً من العلاقات الرياضية التجريبية التي تأخذ بعين الاعتبار تأثير واحد من هذه العوامل (أو أكثر) في حد الصمود للمادة . ولكن لم تتوافر حتى وقتنا هذا تلك العلاقة التي تأخذ بعين

الاعتبار جميع هذه العوامل • فمثلاً تبين العلاقة التجريبية التالية تأثير تركيز الاجهادات في قيم حد الصمود للمادة :

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma - 1}{\sigma - 1k} \quad (8.94)$$

حيث : K_{σ} - معامل تركيز الاجهادات الفعلي •

ويتعلق معامل تركيز الاجهادات الفعلي هذا بدوره بمعامل تركيز الاجهادات النظري α_{σ} وبسدى حساسية المعدن لتركيز الاجهادات وذلك من العلاقة التالية :

$$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma} (\alpha_{\sigma} - 1) \quad (8.95)$$

حيث q_{σ} - معامل حساسية المعدن لتركيز الاجهادات •

وهناك بعض الابحاث التي تعرض العلاقة التجريبية التالية لاجداد قيم K_{σ} :

$$K_{\sigma} = (\alpha_{\sigma})^n \quad (8.96)$$

حيث : n - معامل يتعلق بخواص معدن العينة وشكلها وأبعادها •

وفي أبحاث أخرى تؤخذ بعين الاعتبار الاثتمالات اللدنة في منطقة تركيز الاجهادات :

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma} \frac{1}{1 + r} \quad (8.97)$$

حيث : r - المعامل الدوري لحساسية المادة لمركز الاجهادات (أي الحز

أو التلم أو الثقب ... الخ) ويتعلق هذا المعامل بحد الصود للمادة وبالطاقة الممتصة من قبلها عند اخضاعها لحملٍ ترددي .

ونود أن نوه إلى أنه لا يمكن لأي من العلاقات (8.94) ÷ (8.97) أن تكتسب صفة الشسولية ، ذلك لأن الثوابت q و n و r لاتتعلق بخاصية انادة المختبرة فعصب وإنما تتعلق بكلٍ من الحالة الاجهادية والابعاد المطلقة للعينة وبمواد أخرى . لهذا يصلح استخدام هذه العلاقات فقط في تلك المجالات التي تتلاءم مع المجالات التجريبية التي تم من خلالها الحصول على هذه العلاقات . ولهذا ظهرت علاقات أكثر شسولية من السابقة وتأخذ بعين الاعتبار (ماعدا المعامل α) الميزات الأخرى لحقل الاجهادات . ففي بعض الأبحاث يؤخذ بعين الاعتبار تدرج الاجهادات (gradient) في نقاط الجسم الأكثر اجهاداً :

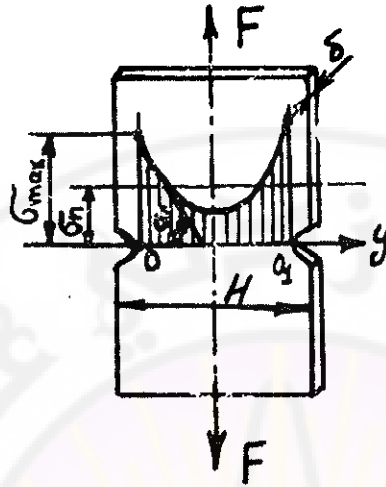
$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}}{[\frac{G_{\sigma}}{a} + 1]^b} \quad (8.98)$$

حيث : a و b - ثوابت تتعلق بخواص المادة وتحدد تجريبياً .
 G_{σ} - التدرج النسبي للاجهاد الناطقي المؤثر باتجاه قوة الشد σ (انظر الشكل ٨ - ٥٨) . حيث يمكن إيجاد G_{σ} كمايلي :

$$G_{\sigma} = \frac{G}{\sigma_{\max}} = \frac{1}{\sigma_{\max}} [K \lg \theta] = \frac{1}{\sigma_{\max}} [\frac{d\sigma}{dy}]_{y=0} \quad (8.99)$$

حيث : K - معامل الأبعاد .

وتتوافر في الوقت الحاضر معادلة أبسط من السابقة لإيجاد قيمة K_{σ} :



الشكل (٨ - ٥٨) : تركيز الإجهادات في صفيحة تحتوي على حزوز جانبية عند إخضاعها لإجهادات شد .

• σ_{max} - الإجهادات الإعتدالية عند قاع الحز في المنطقتين O و O₁ .

• σ_n - الإجهادات المثلثية في حال عدم وجود حزوز . حيث : $\sigma_n = \frac{F}{H \cdot \delta}$

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}}{1 + \sqrt{\rho^* G_{\sigma}}} \quad (8.100)$$

حيث : ... ثابت يتعلق بنوع المادة المختبرة ويدعى نصف قطر العند.

البلوري ويحدد تجريبياً .

مما سبق نستطيع أن نستنتج أنه لا يمكن الإلمام بدراسة تأثير جميع العوامل آفة الذكر في حد الصمود للمادة مجتمعة أو متفرقة ولا يمكن في موضوع واحد الإلمام بالعلاقات الرياضية كافة التي تبين تأثير هذا العامل أو ذاك في حد الصمود وكيفية ادخال هذه العلاقات في الحسابات التصميمية لقطع الآلات أو الإنشاءات المختلفة .

٨ - ١٠ - الاختبارات في ظروف مغايرة للظروف العادية :

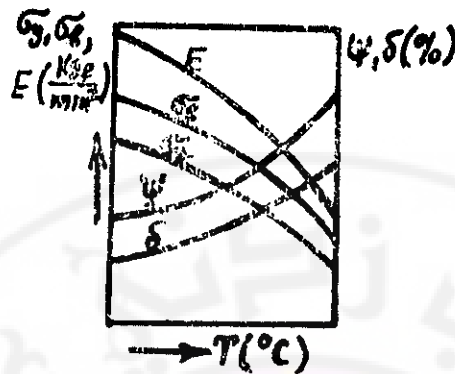
تعرف الاختبارات في ظروف مغايرة للظروف العادية على أنها مجموعة الاختبارات التي تجرى لاختبار المعادن في درجات الحرارة السالبة أو في درجات الحرارة الأعلى من درجة الحرارة العادية .

الاختبارات التي تجرى لاختبار المعادن في درجات الحرارة السالبة أو في درجات الصدم • ويتم اختبار الشد بالطريقة نفسها التي يتم فيها عند درجة الحرارة العادية ولكن بعد تزويد آلة الاختبار بحوض تبريد خاص يحتضن العينة ويردها إلى درجة الحرارة اللازمة أثناء عملية الاختبار • أما اختبار الصدم فيجرى على عينات سبق تبريدها في أحواض تبريد مستقلة كما سبق أن ذكرنا •

أما الاختبارات التي تجرى في درجات الحرارة المرتفعة فأهمها اختبارات الشد والتعب والزحف • واختبار الشد والتعب يتسان بالطرق نفسها التي رأيناها سابقا بعد تزويد آلات الاختبار بأفران انبوية خاصة تحتضن العينات لتسخينها والمحافظة على درجة حرارتها أثناء اجراء الاختبار • وسوف نتعرف فيما يلي على اختبار الزحف والذي يسكن عنده شكلا من أشكال اختبارات الشد في درجات الحرارة المرتفعة ولكن بالتحليل باجهادات أخفض من حد الانسياب ولفترة زمنية طويلة • وقبل أن نبدأ بدراسة ظاهرة الزحف لابد من التعرف على مدى تأثير درجات الحرارة المرتفعة في الخواص الميكانيكية للمعادن •

٨ - ١٠ - ١ - تأثير ارتفاع درجات الحرارة في الخواص الميكانيكية للمعادن :

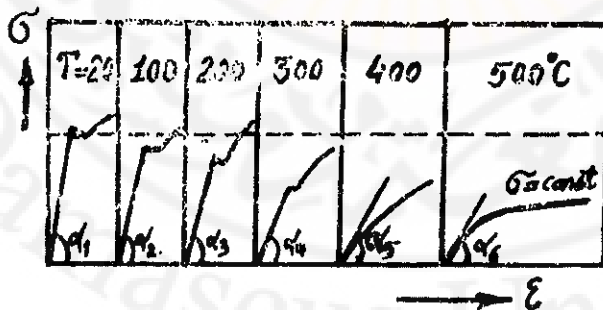
تتغير الخواص الميكانيكية للمعدن عند ارتفاع درجة حرارته ، إذ يؤدي ارتفاع درجة الحرارة بصفة عامة إلى انخفاض قيم حدي المتانة والانسياب للمعدن وازدياد قابليته للتشكيل (أي ازدياد قيم الاستطالة) • والتقلص ψ) • ويبيّن الشكل (٨ - ٥٩) تأثير درجة الحرارة في قيم هذه الوحدات •



الشكل (٨ - ٥٩) : تغير خواص المعدن الميكانيكية بتغير درجة حرارته .

ولقد لوحظ أن مخطط الشد للفولاذ الكربوني يتغير شكله بتغير درجة الحرارة التي يتم عندها الاختبار على الشد (انظر الشكل ٨ - ٦٠) . فمن هذا الشكل نلاحظ أن ارتفاع درجة حرارة الاختبار يؤدي إلى انخفاض قيم حد الانسياب (ممثلاً بالعتبة الأفقية) ، حتى إذا أصبحت درجة حرارة الاختبار أعلى من ٤٠٠ °C تزول معالم هذه العتبة الأفقية ويحدث الزحف في المعدن - أي يستمر الانفعال بالازدياد على الرغم من ثبات قيمة الاجهاد المؤثر في عينة الاختبار .

وفلا نلاحظ من الشكل (٨ - ٦٠) أيضاً أن ازدياد درجة حرارة الاختبار يؤدي إلى نقصان زاوية ميل المستقيم في مخطط الشد ، وهذا يعني انخفاض قيم معامل يونغ (E) بازدياد درجة حرارة الاختبار .



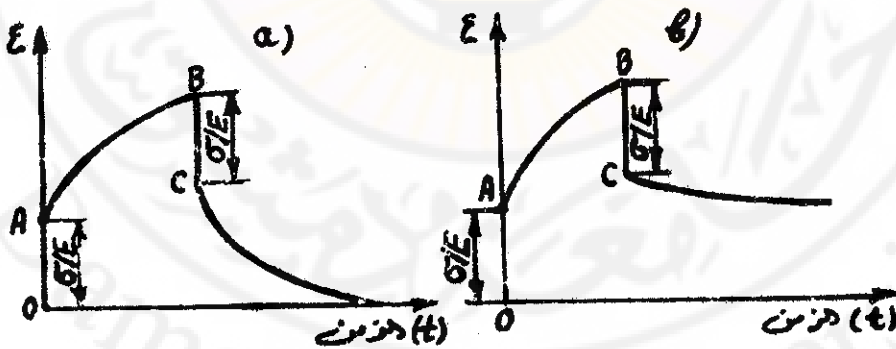
الشكل (٨ - ٦٠) : تغير شكل مخطط الشد للفولاذ الكربوني بتغير درجة حرارة

الاختبار .

٨ - ١٠ - ٢ - المفهوم الاساسي للزحف في المعادن :

إذا حدثت وتغيرت قيم الاجهادات والانفعالات في معدن ما بمرور الزمن على الرغم من أن قيم الحمل المطبق على المعدن لم تتغير فإن هذه الظاهرة تدعى بالزحف. ويدعى الشق الأول من هذه الظاهرة (أي تغير الانفعالات بمرور الزمن) بالزحف الذاتي ، أما الشق الثاني من هذه الظاهرة (تغير الاجهادات بمرور الزمن) فيدعى بالارتخاء .

ويسكن للزحف الذاتي أن يكون مرناً ولدناً. فإذا كان الزحف الذاتي مرناً فإن الانفعالات التي تظهر بمرور الزمن تختفي نهائياً وبمرور الزمن أيضاً وذلك عند زوال الحمل المطبق . أما إذا كان الزحف الذاتي لدناً فإن الانفعالات المرنة تختفي بزوال الحمل المطبق ، أما الانفعالات اللدنة فإن قيمها تنخفض ببطء ولكنها لاتزول نهائياً (انظر الشكل ٨ - ٦١ b) . ونود أن تنوه هنا إلى أن الزحف في المعادن يحدث سواءً أكانت الانفعالات التي تظهر في بداية تطبيق الحمل انفعالات مرنة أم لدنة (متبقية) .



الشكل (٨ - ٦١) :
 (a) مخطط الزحف الذاتي المرن .
 (b) مخطط الزحف الذاتي اللدن .

أما الشق الثاني من ظاهرة الزحف وهو الارتخاء (ويعني انخفاض قيم الاجهاد حتى ولو بقيت قيم الانفعالات ثابتة) فيمكن تفسيره كما يلي :

لنفرض أنه تم تطبيق قوى شد على عينة ما عند درجة حرارة معينة بحيث كانت الاجهادات الناتجة تقع ضمن مجال المرونة للمعدن عند هذه الدرجة من الحرارة ، ولنفرض أن الانفعال الكلي (الانفعال المرن + الانفعال اللدن) لم يتغير بمرور الزمن ، أي أن :

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = \text{const} \quad (8.101)$$

حيث : ϵ_e - الانفعال المرن ، ϵ_p - الانفعال اللدن .

ولكن قيم الانفعال اللدن ϵ_p تزداد بمرور الزمن وهذا يعني أن قيم الانفعال

المرن ϵ_e سوف تنخفض . ونعلم من قانون هوك أن الانفعال المرن ϵ_e :

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad (8.102)$$

وبما أن الانفعال الكلي لا يتغير بمرور الزمن ويساوي الانفعال الأولي

(0) ϵ . وماعدا ذلك وفي اللحظات الأولى من تطبيق الحمل يتحقق قانون هوك، أي أن :

$$\epsilon = \epsilon(0) = \frac{\sigma(0)}{E} \quad (8.103)$$

حيث : (0) ϵ - الاجهاد المؤثر في اللحظات الأولى من تطبيق الحمل . ومنه

نجد أن :

$$\frac{\sigma(0)}{E} = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_p \quad (8.104)$$

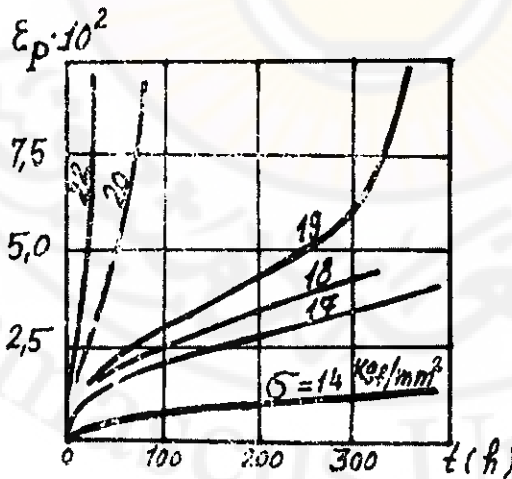
ومن العلاقة (8.104) نلاحظ أن ازدياد الانفعالات اللدنة يؤدي باستمرار إلى انخفاض الاجهاد وحدوث الارتخاء .

٨ - ١٠ - ٣ - مخطط الزحف للمعادن :

نحن نعلم أنه عند تحميل عينة ما فإن الانفعال يزداد من الصفر وحتى قيمة معينة . والانفعال الذي يظهر عند التحميل يسكن أن يكون مرناً أو أن يكون مرناً - لدناً وذلك تبعاً لقيمة الحمل المطبق في بداية الاختبار . ولقد بينا آنفاً أن الانفعال في العينة يزداد بمرور الزمن .

وجرت العادة على أن تعالج نتائج اختبار الزحف على شكل منحنيات (انظر الشكل ٨ - ٦٢) ، حيث تبيّن هذه المنحنيات علاقة الانفعال الكلي (أو الانفعال اللدن) بالزمن وذلك عند ثبات كلٍ من قيم الاجهادات المطبقة ودرجة حرارة الاختبار ، وتدعى هذه المخططات بمنحنيات الزحف .

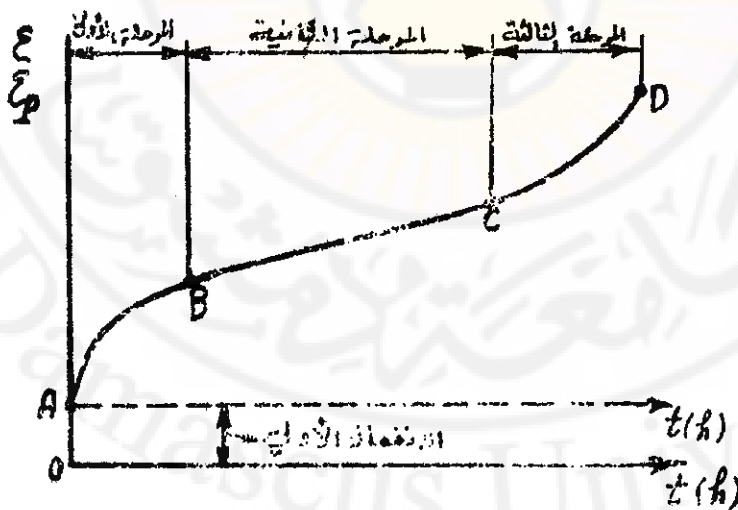
يتعلق شكل منحنيات الزحف بقيم الاجهادات المطبقة ودرجة حرارة الاختبار . فمعد تطبيق حمل ما على عينة كانت قد سُخِّت



الشكل (٨ - ٦٢) : منحنيات الزحف للفولاذ عند درجة الحرارة (600 °C) .

إلى درجة حرارة معينة فإن الانفعال يزداد بسرعة من الصفر وحتى قيمة معينة (المخطط الشاقولي OA على الشكل ٨ - ٦٣) . فإذا كان الاجهاد المطبق يقع ضمن مجال المرونة لمعدن العينة فإن هذا الانفعال مرن وإذا كانت قيم الاجهاد المطبق تفوق حد المرونة فإن الانفعال مرن - لدن في الوقت نفسه وعند توقف زيادة الحمل المطبق فإن الانفعال الكلي في العينة سوف يزداد بالتدريج بمرور الزمن وسوف يكون ازدياده وفق المنحني ABCD (انظر الشكل ٨ - ٦٣) . وإن مسقط أي نقطة من هذا المنحني على محور العينات يحدد قيم الانفعال الكلي في العينة بعد مرور زمن معين يتحدد على محور السينات . ويتألف هذا الانفعال الكلي من الانفعال الأولي في لحظة تطبيق الحمل والانفعال اللدن الناتج عن الزحف .

يتم أحياناً رسم منحني الزحف الذي يُبيّن فقط علاقة الانفعال اللدن ϵ_p (المتشكل نتيجة الزحف) بالزمن ، وعندها فإن محور السينات في مخطط الزحف هو الخط المتقطع على الشكل (٨ - ٦٣) .



الشكل (٨ - ٦٣) منحني الزحف (أو مخطط الزحف) .

يعبر ظل زاوية ميل المماس للمنحني ABCD على محور السينات عن سرعة الانفعال $\dot{\epsilon}$ والتي تساوي في الوقت نفسه سرعة الانفعال اللدن $\dot{\epsilon}_p$:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_p = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\epsilon_0}{dt} \quad (8.105)$$

نلاحظ من الشكل (٨ - ٦٣) أن ازدياد الانفعال في اختبار الزحف يتم على ثلاث مراحل :

في المرحلة الاولى (المنحني AB) : تتناقص سرعة الانفعال اللدن بالتدريج حتى نهاية هذه المرحلة .

في المرحلة الثانية (الخط AC) : وتدعى مرحلة الزحف الثابت ونصبح معها العلاقة بين الانفعال والزمن علاقة خطية - أي أن سرعة الزحف تكون عند أدنى قيمة لها وثابتة ، وعند درجة حرارة معينة تشكل هذه السرعة تابعا لاجهاد :

$$\dot{\epsilon}_{p \min} = Q(\sigma) \quad (8.106)$$

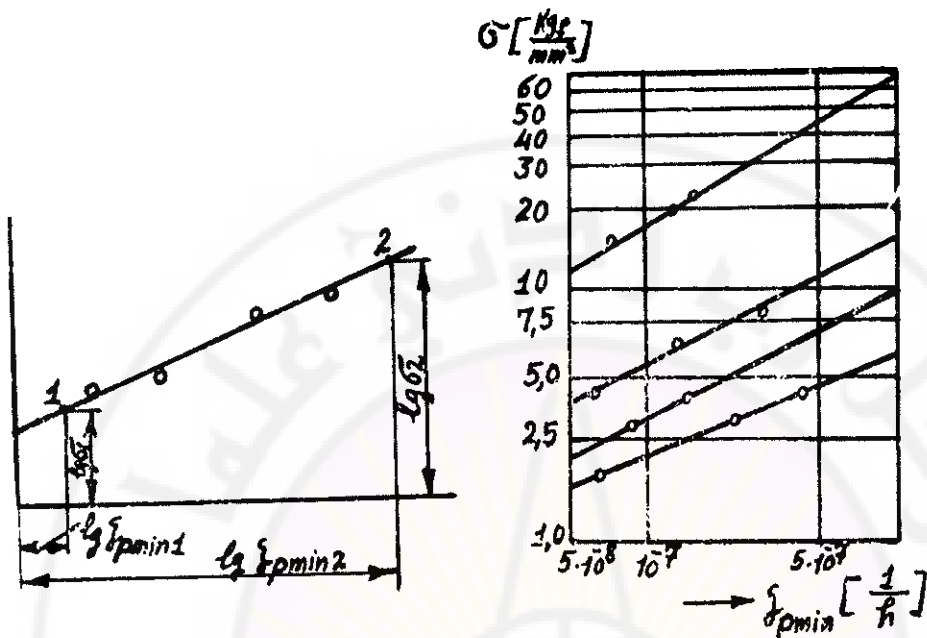
ولقد ثبت تجريبيا أن علاقة السرعة الدنيا للزحف (للانفعال اللدن) بالاجهاد هي علاقة أسية :

$$\dot{\epsilon}_{p \min} = k \sigma^n \quad (8.107)$$

أو :

$$\lg \dot{\epsilon}_{p \min} = \lg k + n \lg \sigma \quad (8.108)$$

وتعني المعادلة أن العلاقة بين لوغاريتم سرعة الزحف الدنيا ولوغاريتم الاجهاد هي علاقة خطية ، وهذا ما يؤكد الشكل (٨ - ٦٤) ، إذ يبيّن هذا الشكل مجموعة من منحنيات الزحف للفولاذ الكرومي . ويسكننا من هذه المنحنيات أن نحصل على قيم المعامل k والأس n ، حيث نقوم في بداية الامر بحساب



الشكل (٨ - ٦٥) : طريقة تعيين المعامل k والاس n

الشكل (٨ - ٦٤) : العلاقة

التجريبية بين قيم الإجهاد المطبق وسرعة الزحف الدنيا في الفولاذ الكربوني .

سرعة الزحف الدنيا من أجل إجهادات مختلفة ، ثم ننقل النتائج إلى المخطط الذي احداثياته $\lg \sigma$ و $\lg \xi_{p \min}$ (انظر الشكل ٨-٦٥) ، ثم نرسم المستقيم

التقريبي الذي يجمع بين نتائج التجارب ونختار على هذا المستقيم نقطتين 1 و 2

احداثياتهما : $\lg \xi_{p \min 1}$ و $\lg \sigma_1$ ، $\lg \xi_{p \min 2}$ و $\lg \sigma_2$ بالترتيب .

وبالرجوع إلى المعادلة (8.108) نجد أن :

$$\left. \begin{aligned} \lg \xi_{p \min 1} &= \lg k + n \lg \sigma_1 \\ \lg \xi_{p \min 2} &= \lg k + n \lg \sigma_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.109)$$

ومنه نجد أن :

$$n = \frac{\lg \frac{\xi_{p \min 2}}{\xi_{p \min 1}}}{\lg \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \quad (8.110)$$

$$\left. \begin{aligned} \lg k &= \lg \xi_{p \min 1} - n \lg \sigma_1 \\ \lg k &= \lg \xi_{p \min 2} - n \lg \sigma_2 \end{aligned} \right\} \quad (8.111)$$

وتمعطى قيم n عادةً في جداول خاصة وتتراوح قيمها بين (1,5 ÷ 10,5)
لأنواع مختلفة من المعادن والخلائط المعدنية .

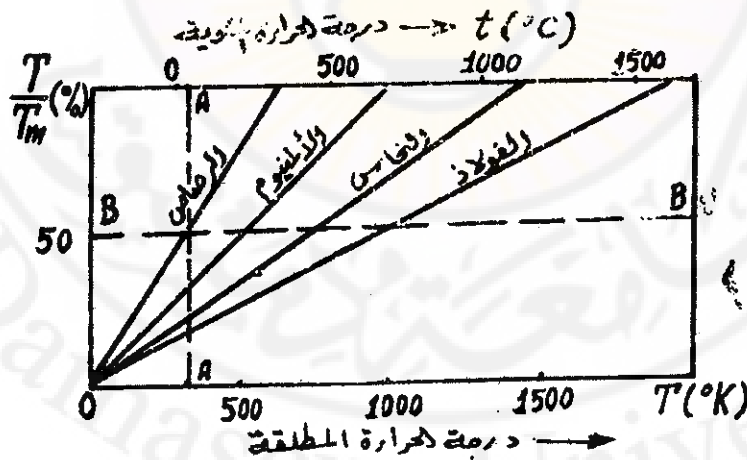
في المرحلة الثالثة (المنحني CD) : تزداد سرعة الزحف بشكل مستمر ويحدث تصدع العينة في النقطة D . وتظهر هذه المرحلة عند بدء تشكل الشقوق أو الشروخ الصغيرة بين البلورات والتي لا تلبث أن تبدأ بالازدياد في العدد والانتساع في الحجم ، الامر الذي يؤدي إلى تناقص في المقطع وازدياد في الاجهاد وبالتالي تسارع الانفعال حتى يتم التصدع ، لهذا فان التصدع الناجم عن الزحف يتم عادةً عبر حدود الحبيبات على غرار ما يحدث في التصدع الهش . ونود أن ننوه إلى أن ازدياد قيم k من الاجهاد المطبق ودرجة حرارة الاختبار على الزحف يؤدي إلى ازدياد سرعة الزحف وبالتالي إلى قصر الفترة الزمنية للمرحلة الثانية .

٨ - ١٠ - ٤ - مخطط درجات حرارة التناظر :

لا يحدث الزحف في المعدن عادةً إلا إذا تجاوزنا بتسخينه درجة حرارة

معينة ، وتتعلق درجة الحرارة هذه بنوع المعدن وبخاصة بدرجة حرارة انصهاره .
 فمثلاً لا يحدث الزحف في الحديد إلا إذا كان مسخنًا إلى درجة حرارة أعلى من
 300°C ، بينما يمكن أن يحدث الزحف في الرصاص عند درجة الحرارة 27°C .
 وبغية دراسة تأثير درجة الحرارة في سلوك الزحف عند المعادن ومعرفة التوازن
 المشتركة لهذا السلوك في المعادن المختلفة تم إيجاد ما يسمى درجة حرارة التناظر
 وهي النسبة بين درجة الحرارة المطلقة التي يتم عندها اختبار معدن ما على الزحف
 ودرجة حرارة انصهاره المطلقة (أي $\frac{T}{T_m}$) . وهذا يعني أن درجة حرارة
 انتناظر هذه هي نسبة مئوية . وتستعمل درجة حرارة التناظر للمقارنة بين سلوك
 الزحف عند المعادن على الرغم من اختلاف كل من درجة حرارة انصهار كل منها
 ودرجة الحرارة التي يتم عندها الاختبار على الزحف (انظر المخطط على الشكل
 ٨ - ٦٦) ، حيث تتضمن احداثيات هذا المخطط :

- ١ - درجة حرارة التناظر مقدرة بالنسبة المئوية على المحور الشاقولي .
- ٢ - درجة الحرارة المطلقة مقدرة بالـ (K) على المحور الأفقي السفلي .



الشكل (٨ - ٦٦) : مخطط درجات حرارة التناظر .

٣ - درجة الحرارة المثوية مقدرة بال (°C) على المحور الافقي العلوي .

ولقد تم رسم خطوط مستقيمة تصل ما بين درجة الصفر المطلق ودرجة انصهار كل من المعادن المبيّنة على المخطط . فاذا أخذنا درجة حرارة التناظر مساوية 50% وأنشأنا منها خطاً أفقياً (BB) فإنه يتقاطع مع المستقيمات المرسومة في النقاط التي احداثياتها على المحور الافقي العلوي هي : 27°C للرصاص، 195°C للالنيوم ، 405°C للنحاس، 625°C للفولاذ ، وتكون النسبة 50% محققة وذلك لأن :

$$\frac{T}{T_m} = \frac{27 + 273}{327 + 273} = \frac{195 + 273}{660 + 273} =$$

$$= \frac{405 + 273}{1083 + 273} = \frac{625 + 273}{1520 + 273} = 50\% \quad (8.112)$$

وهذا يعني أن سلوك الزحف عند معدن الرصاص في درجة الحرارة 27°C مشابه لسلوك الزحف عند معدن الالنيوم في الدرجة 195°C ومشابه لسلوك الزحف عند معدن النحاس في الدرجة 405°C وهكذا .

من هنا نستنتج أنه إذا أردنا معرفة سلوك الزحف في الفولاذ عند الدرجة 625°C فإنه يمكننا اختبار عينة من معدن الرصاص عند درجة حرارة الغرفة تقريباً (27°C) بدلاً من اختبار عينة من الفولاذ عند درجة الحرارة المرتفعة (625°C) .

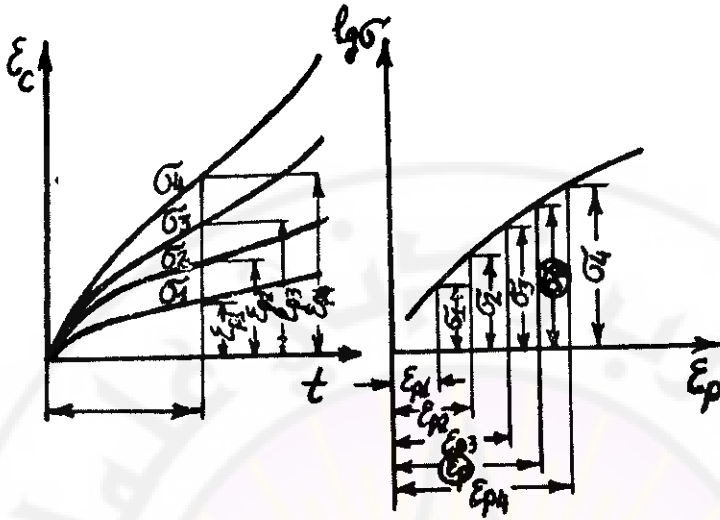
أما الخط الشاقولي (AA) فيتقاطع مع هذه المستقيمات عند درجات حرارة تناظر متباينة مما يدل على تباين سلوك الزحف عند هذه المعادن في درجة حرارة الاختبار نفسها .

٨ - ١٠ - ٥ - تعيين حد الزحف للمعدن :

يُعرف حد الزحف للمعدن (σ_p) على أنه الاجهاد الذي يسبب انفعالا لدنا ذا مقدار محدد في المواصفات التقنية للمعدن خلال فترة زمنية معينة . كما يعرف حد الزحف (σ_p) للمعدن أحيانا على أنه الاجهاد الذي يسبب سرعة زحف ذات مقدار محدد في المواصفات التقنية للمعدن . فمن التعريف الأول نستنتج أن حد الزحف يتعلق بكل من درجة حرارة الاختبار وزمن الاختبار، ومن التعريف الثاني نستنتج أن حد الزحف يتعلق بكل من درجة حرارة الاختبار وسرعة الزحف .

فاذا أردنا تعيين حد الزحف للمعدن بناءً على التعريف الاول - أي انطلاقاً من معرفة مسبقة لمقدار الانفعال اللدن ϵ_p خلال فترة زمنية t ، فاننا نرسم شاقولاً يبعد مسافة t عن محور العينات في المخطط المبيّن على الشكل (٨ - ٦٧) ، ذلك المخطط الذي يحتوي على مجموعة من منحنيات الزحف تم ايجادها بتطبيق قيم اجهادات مختلفة على عينات من المعدن نفسه وعند درجة الحرارة نفسها ومن نقاط تقاطع هذا الشاقول مع منحنيات الزحف نوجد قيم الاجهاد σ_1 و σ_2 و σ_3 و σ_4 الموافقة لقيم الانفعال ϵ_{p1} و ϵ_{p2} و ϵ_{p3} و ϵ_{p4} بالترتيب وبمسد زمن اختبار محدد t . ثم ننقل هذه القيم المستنتجة الى مخطط آخر مبيّن على الشكل (٨ - ٦٨) ، ومن هذا المخطط نستطيع ايجاد حد الزحف σ_p على محور العينات بناءً على معرفة مسبقة لقيمة الانفعال ϵ_p على محور السينات .

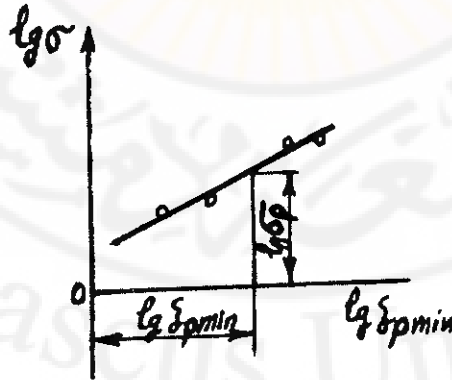
أما إذا كان المطلوب هو تعيين حد الزحف الموافق لسرعة زحف $\dot{\epsilon}_{p \min}$ معروفة المقدار مسبقاً ، فاننا نقوم في البداية بايجاد قيم سرعات الانفعال اللدن الدنيا



الشكل (٨ - ٦٧)
مجموعة من منحنيات الزحف .

الشكل (٨ - ٦٨)
علاقة الاجهاد بالانفعال اللدن بعد فترة
زمنية محددة من اختبار العينات على الزحف .

عند تطبيق اجهادات مختلفة على عينات من المعدن نفسه وعند درجة الحرارة نفسها ونرسم المنحني الذي يبيّن علاقة الاجهاد بسرعة الانفعال اللدن الدنيا ، ثم نأخذ على محور السينات مقدار سرعة الزحف المفروضة وعلى محور العينات نوجد مقدار حد الزحف الموافق ولقد شرحنا هذه الطريقة بالتفصيل آنفاً .



الشكل (٨ - ٦٩) : علاقة الاجهاد بسرعة الزحف الدنيا في المعدن .

الفصل التاسع

المواد غير المعدنية

يُنسب إلى المواد غير المعدنية تلك المواد التي تكون بنيتها الصلبة غير منتظمة كما في المواد المعدنية . ومن المواد غير المعدنية الزجاج واللدائن والبيتون والخشب والحجر وغيرها . ونحاول في هذا الفصل تعريف القارئ بكل من المتراكيب والمزايا الأساسية التي تتمتع بها بعض هذه المواد غير المعدنية .

٩ - ١ - الخشب :

كان الخشب وما زال يُستعمل في صناعات مختلفة وفي بناء بعض الانشاءات . وتتميز الإنشاءات الخشبية عن غيرها من الانشاءات المعدنية والبيتونية بخفة وزن الأولى وسهولة تشغيلها ونقلها وتجميعها . ويتعرض الخشب بسرور الزمن للتآكل والتلف تحت تأثير العوامل الجوية المختلفة يمكن أن يُلتهب بسهولة ولا يتحمل بروتة كبيرة عند تطبيق قوى شد أو ضغط ، إلا أن الخشب يتحمل هتانة صدم جيدة لذلك يفضل استعماله في بناء الانشاءات التي يمكن أن تتعرض لقوى صدم أثناء استعمالها . وعلى الرغم من توافر بعض المواد الخفيفة الأخرى كاللدائن والالمنيوم والتي يمكن أن تحل محل الخشب في بعض الصناعات إلا أن الخشب لا يزال المادة المفضلة في بعض المواضع .

٩-١-١ - تركيب الخشب وبنيته :

إن الخشب مادة عضوية تتشكل طبيعياً وتتألف بشكل أساسي من عناصر انبوية متطاولة ومتوازية تسمى الخلايا الانبوية ، وتختلف الخلايا الانبوية عن بعضها بعضاً بالابعاد وسماكة الجدار وذلك تبعاً لموضع الخلية الانبوية في جذع الشجرة وعمر الشجرة وظروف نموها ونوعها . وتكون هذه الخلايا مغلقة في نهاياتها وتمتص الماء من خلال جدرانها المسامية . وتتألف جدران الخلايا من سلسلة من جزيئات السيليلوز المتوضعة بشكل يوازي محور الخلية نفسها . وتنمو الشجرة عادةً بإضافة حلقات متعاقبة سنوية من الألياف الخشبية ، وإذا أخذنا مقطعاً عرضياً للشجرة فاننا نلاحظ وجود اللب المركزي والحلقات المحيطة بهذا اللب متحدة المركز تقريباً . ويختلف عرض هذه الحلقات تبعاً لسنف الشجرة والظروف الطبيعية التي أدت إلى تشكل هذه الحلقات . ويتغير معدل النمو للشجرة في المنطقة المعتدلة بشكل واسع حسب فصول السنة ، فالنمو في الربيع يكون سريعاً ، وفي الصيف وأوائل الخريف يكون أقل سرعةً ، وفي أواخر الخريف والشتاء يكون معدل النمو مساوياً للصفر . ويكون الخشب الربيعي عادةً بلوناً أبيضاً من الخشب الصيفي ، وتظهر الحلقات السنوية للشجرة عادةً واضحةً وذلك بسبب تجاوز حلقات الصيف الداكنة مع حلقات الربيع الكاشفة للعام الذي يليه .

ونود أن ننوه أنه عند نمو الشجرة تصبح نهاية جذع الفصن في الشجرة محاذة بحلقات سنوية متعاقبة ، ويؤدي هذا إلى تشكل عقد في الخشب وتكون هذه العقد عيوباً خطيرة في الخشب .

٩-١-٢ - تصنيف الخشب :

يتم تصنيف الخشب إما تجارياً أو صناعياً . فإذا كان التصنيف تجارياً فإن

الخشب نوعان هما :

أ - الخشب الطري : ومن أنواعه خشب الصنوبر الشرقي والغربي (وكلاهما أبيض) والصنوبر الاحمر والشوكران الشرقي والغربي والشوح والتنوب القضي والأبيض - القضي والأرز والسرو والشربين والسكوية وغيرها •

ب - الخشب القاسي : ومن أنواعه خشب الزان والجوز والبالوط الابيض والاحمر والدراق الصخري والامريكي والقيقب والكرز والكافور والشوح والماهوغوني والكستناء والاسفندان •

ويبقى مفهوم تصنيف الخشب إلى طري وقاسٍ مفهوماً نسبياً وذلك لان بعض الانواع القاسية من الخشب الطري تكون أقسى من بعض الانواع الطرية من الخشب القاسي •

أما إذا كان التصنيف صناعياً فان الخشب ثلاثة أنواع هي :

أ - الخشب الخام : وهو الخشب الذي تم تهذيب أغصانه وقطعت جذوعه وفروعه إلى الحجوم القابلة للنقل والنشر •

ب - الخشب المسوى : وهو الخشب الذي تم تشغيله على المكشطة (أي سويت سطوحه) • ويمكن أن تسوى السطوح من وجه واحد أو من وجهين أو من طرف واحد ووجه واحد •••

ج - الخشب المشغول : وهو الخشب الذي تم تشغيله على آلات السحج والتشكيل في ورشات التجارة بغية تركيبه في الاماكن المخصصة له •

٩ - ١ - ٢ - الخواص الفيزيائية للخشب :

تباين قيم الخواص الفيزيائية بين أنواع الخشب المختلفة وحتى أنه يمكن

أن تتباين هذه القيم لأشجار من الصنف نفسه • وسوف نورد فيما يلي بعضاً من الخواص الفيزيائية للخشب •

١- **محتوى الرطوبة :** يحتوي الخشب على كمية من الماء تختلف بين نوع وآخر وحالة وأخرى • ويدخل الماء عادةً في جزيئات السيليلوز التي تشكل جدران الخلايا الانبوية وفي فجوات هذه الخلايا • وعندما يصل محتوى الماء في هذه الخلايا إلى حد الأشباع فإنه تتحدد أعلى نسبة للرطوبة في الخشب وعلى أساسها تقاس نسب الرطوبة الأخرى في الخشب • وتبلغ نسبة الرطوبة في الخشب الجاف ١٢ - ١٥٪ ، بينما يمكن أن تصل نسبة الرطوبة في الخشب الطري إلى ٤٠ - ١٠٠٪ •

٢- **انكماش الخشب وتغير أبعاده :** عند تجفيف الخشب سواءً بتعرضه للتأثيرات الجوية من هواء ودرجة حرارة أو تجفيفه صناعياً فإنه ينكش ويتغير محتوى الماء داخل جدران الخلايا الانبوية • ويكون الانكماش المحيطي في عرق الخشب أكبر من الانكماش القطري • ويؤدي انكماش الخشب غير المنتظم إلى إحداث إجهادات داخلية في الخشب تسبب وجود تشققات وعيوب أخرى فيه • وتحصل العيوب (بما فيها التشققات) غالباً عندما يكون التجفيف سريعاً ، إذ يمكن أن يؤدي التجفيف السريع إلى إحداث تشققات مختلفة الاتجاهات والتواءات في عرق الخشب تسبب تشوهات كبيرة حتى في ألواح الخشب المقطعة من الشجرة سواءً أكانت هذه الألواح قد نشرت بشكل مناسب للحلقات السنوية أم نشرت بشكل يوازي أقطار العرق •

٣- **احتراق الخشب :** يتعلق احتراق الخشب بعدة عوامل أهمها :

١- درجة الحرارة اللازمة لبداية الاشتعال وهي ٢٧٣ °C تقريباً •

٢- وجود مواد قابلة للاشتعال تحيط بالخشب •

٣- حجم الخشب وشكله ، فالأطراف الرفيعة تبدأ بالاحتراق وبشكل

أسرع بينما تتأخر الأجزاء الكبيرة لتتشب فيها النيران.

٤ - التسخين المتواصل لفترة زمنية طويلة يسكن أن يسبب اندلاع النار ولو كانت درجة الحرارة أقل من درجة الحرارة اللازمة لبداية الاشتعال .

٤ - القيمة الوقودية للخشب : تتعلق القيمة الوقودية بشكل أساسي بالوزن الجاف من الخشب وبسقدار ما يحتوي عليه الخشب من مواد مختلفة كالصغ والأحماض ونسبة الرطوبة . فكلما ازدادت نسبة الرطوبة في الخشب انخفضت قيمته الوقودية وذلك بسبب ضياع جزء من الحرارة على تبخر الماء ، وهناك علاقة تقريبية بين القيمة الوقودية ونسبة الرطوبة :

$$Q = H \frac{100 - m_c / 7}{100 + m_c} \quad (9.1)$$

حيث :

H - حرارة الاحتراق وتختلف قيمتها باختلاف نوع الخشب .
m_c - نسبة الرطوبة المتوية في الخشب .

٥ - ناقلية الخشب للحرارة ومعايير تمده الحراري : تتغير ناقلية الخشب للحرارة تبعاً لتوافق تدفق الحرارة أو عدم توافقه مع خطوط تشكل الخشب وهناك نوعان من الناقلية : الناقلية العرضية والناقلية الطولية . فالناقلية العرضية يمكن حسابها من علاقة ماك لين (Mac Lean) :

$$K = G (1.39 + CM) + 0.165 \quad (9.2)$$

حيث : G - الجاذبية الخاصة وتتنلق بقيمة كل من حجم الخشب ووزنه ودرجة رطوبته M .
C - ثابت وله قيمتان :

• $C = 0,028$ إذا كانت نسبة الرطوبة أقل من 40% .

• $C = 0,038$ إذا كانت نسبة الرطوبة أكبر من 40% .

أما الناقلية الطولية فهي أكبر من الناقلية العرضية بمقدار $(2,25 \div 2,75)$ مرة . وأما معامل التمدد الحراري للخشب فيختلف من اتجاه لآخر ، ويساوي معامل التمدد الطولي الوسطي بين درجتي الحرارة $(-50^{\circ}\text{C}$ و $+50^{\circ}\text{C}$) نحو $3,39 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$.

٦- ناقلية الخشب للكهرباء : تتعلق مقاومة الخشب الكهربائية للتيار المستمر بشكل مباشر بدرجة رطوبته وبشكل غير مباشر بكل من كثافته واتجاه خطوط تشكله ودرجة حرارته وبمقدار ما يحتوي عليه النسيج الخشبي من فلزات وتتراوح مقاومة الخشب الجاف بين $(3 \cdot 10^{17} \div 3 \cdot 10^{18} \Omega \cdot \text{cm})$ ، وتنخفض مقاومة الخشب للكهرباء الى المقدار $(10^8 \Omega \cdot \text{cm})$ عندما تصل درجة رطوبته إلى المقدار 18% .

ونستطيع بصفة عامة أن نقول أن لوغاريتم ناقلية الخشب للكهرباء (عكس المقاومة) يتناسب طردياً مع درجة رطوبته ، إذ يزداد لوغاريتم الناقلية بازدياد الرطوبة ، حتى إذا وصلت نسبة الرطوبة الى درجة الاشباع فإن مقاومة الخشب للكهرباء تقترب من مقاومة الماء لها وتساوي $(10^5 \div 10^6 \Omega \cdot \text{cm})$.

٧- ناقلية الخشب للصوت : تعطى ناقلية الخشب للصوت بالعلاقة التالية :

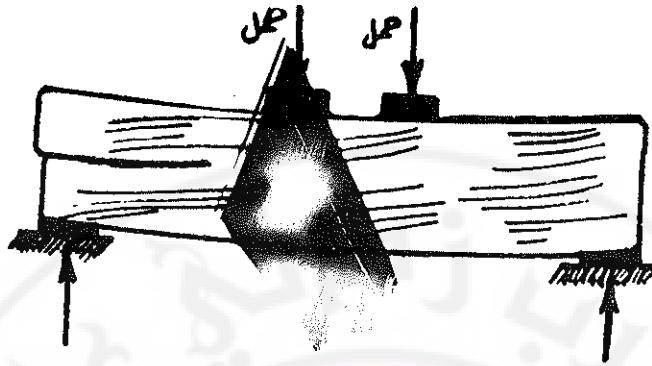
$$V = \sqrt{E / \rho} \quad (9.3)$$

- حيث : V - سرعة الصوت في الخشب (in / sec) .
 E - معامل المرونة للخشب أو معامل يوتغ (lb / in²) .
 ρ - الوزن النوعي للخشب (Sulgs / in³) .
- ٣٤٥ -

ومعامل المرونة الديناميكي للخشب أكبر من معامل المرونة الستاتيكي بنحو ١٠٪ ، وتتغير قيمة هذا المعامل بتغير درجة الرطوبة ، حيث تتغير قيمته بسقدار ١٣٪ لكل تغير يساوي ١٪ في درجة الرطوبة .

٩ - ١ - ٤ - الخواص الميكانيكية للخشب :

تتأثر الخواص الميكانيكية للخشب بعدة عوامل ، فمثلاً تبين التجارب المخبرية أن إجهاد الأمان العملي أصغر بكثير من الإجهاد الأعظمي في ألواح الخشب الانشائية . وبعبارة أخرى من الضروري استعمال عامل أمان كبير جداً في الانشاءات الخشبية . وأحد العوامل التي لها تأثير كبير في مقاومة الخشب هو التجذع . فمقاومة الخشب لقوى الشد والضغط وفق الاتجاه الموازي للتجذع تكون أكبر بكثير من مقاومته لهذه القوى وفق الاتجاه العمودي للتجذع . كما أن مقاومة الخشب لقوى القص على طول التجذع أقل بكثير جداً من مقاومته لقوى الشد أو الضغط ، لهذا يجب أخذ هذه الحقيقة بعين الاعتبار عند دراسة مقاومة الجيزان الخشبية . ولهذا السبب فإن القص الافقي في الجيزان الخشبية أكثر أهمية مما في الجيزان الفولاذية ويجب ادخال ذلك في الحسابات التصميمية للجيزان الخشبية . ويبين الشكل (٩ - ١) انهياراً مميزاً لجائز بوساطة القص الافقي . ونود هنا أن نذكر أن متوسط قيم مقاومة المرونة العظمى للاخشاب وفي مختلف حالات التحميل ولعينات متباينة الأبعاد تعطى عادةً ضمن جداول خاصة يمكن استخدامها في الحسابات التصميمية للخشب بمختلف أنواعه الطري والقاسي . ويبين الجدول (٩ - ١) بعضاً من هذه القيم وذلك عند تطبيق قوى تحميل مختلفة مثل الانحناء المتصالب والضغط الموازي للتجذع والضغط المؤثر في عرض التجذع والقص الموازي للتجذع . ومن هذا الجدول نلاحظ أن قيم كلٍّ من مقاومة الخضوع والمقاومة القصوى تختلف اختلافاً كبيراً باختلاف نوعية الأحمال المطبقة على الخشب ومن الصنف نفسه .



الشكل (٩ - ١) : انهيار جائب خشبي بالقص الأفقي .

ونود أن تنوه أيضاً إلى أن ليس للخشب نقطة خضوع بارزة وإن إجهاد مقاومة الخضوع الذي يتعين عادةً بانحراف مقداره (0,05%) من الانفعال على مخطط الاجهاد - الانفعال يعطي معياراً جيداً لمقاومة الخضوع لمختلف أنواع الخشب الواردة في الجدول (٩ - ١) .

٩ - ٢ - الزجاج :

الزجاج هو ناتج لاعضوي يصنع عادةً من السيليكات المصهورة عند درجة حرارة عالية مع بعض الإضافات الأخرى ويبرد إلى حالته الصلبة دون أن يمر بحالة التبلور كما في المعادن . من هنا نجد أن كل أنواع الزجاج تكون في حالتها الطبيعية غير بلورية ، ويتمتع الزجاج بثلاث خصائص هامة هي : القساوة والشفافية والمقاومة الكيميائية تجعل منه مادة لا غنى عنها في المدنية الحديثة .

ويمكن صناعة معظم أنواع الزجاج بإذابة مركباته التي تتكون من الأكاسيد، ومن خلال التحكم بأنواع الأكاسيد المستعملة يمكن التحكم بالخواص المرغوب

الجدول (٩ - ١) متوسط قيم مقاومة المرونة العظمى لبعض الأخشاب في حالات مختلفة وليئات متباينة الحجم •

نوع الخشب	الوزن الحجمي (lb./in ³)	المقاومة [lb / in ²) × 1000]				نقص موازي التجذع	نقص موازي التجذع
		انحناء متصالب	ضغط موازي للتجذع	مقاومة التجذع	مقاومة التجذع		
نوع الخشب	الوزن الحجمي (lb./in ³)	الاجهاد الاعظمي السبب للانحناء	الاجهاد الاعظمي السبب للانحناء	الاجهاد الاعظمي السبب للانحناء	الاجهاد الاعظمي السبب للانحناء	نقص موازي التجذع	نقص موازي التجذع
		الاجهاد الاعظمي السبب للانحناء	الاجهاد الاعظمي السبب للانحناء	الاجهاد الاعظمي السبب للانحناء	الاجهاد الاعظمي السبب للانحناء		
المسكوبية	22	4,8	7,8	3,9	5,1	0,56	0,8
التوب	39	8,4	10,0	5,7	7,3	0,7	0,8
الارز	23	5,8	6,3	4,0	5,2	0,7	0,4
السرو	29	6,6	7,9	—	6,0	0,8	0,55
المسكوبية	22	4,8	7,8	3,9	5,1	0,56	0,8
التوب	39	8,4	10,0	5,7	7,3	0,7	0,8
الارز	23	5,8	6,3	4,0	5,2	0,7	0,4
السرو	29	6,6	7,9	—	6,0	0,8	0,55

١ - خشب طري ، حجم صغير ، عينات اخبار غير مشروطية ومجففة بالهواء (نسبة الرطوبة ١٢ ٪) .

٢ - خشب قاس - حجم صغير - عينات اختبار غير مشروطة ، مجففة بالهواء (نسبة الرطوبة ١٢ ٪) .

1,0	2,2	8,5	5,0	13,1	9,6	50	السنديان الأبيض
1,1	2,3	7,2	4,5	11,4	9,2	45	السنديان الأحمر
1,15	2,7	10,0	5,5	16,0	11,5	50	الجوزة الأمريكية
1,10	1,9	6,0	4,0	10,8	7,9	39	الدرداء
0,8	1,2	6,5	5,5	10,3	7,3	34	البقيعاء
0,5	1,3	8,0	5,5	7,0	5,0	43	التقيب

في الحصول عليها في الزجاج مثل معامل التمدد وزاوية انحراف الضوء أثناء مروره بالزجاج وخواص أخرى •

٩-٢-١ - تصنيع الزجاج : تصل درجة انصهار الزجاج العادي إلى نحو 1493°C ، أما درجة الحرارة التي يفقد عندها هذا الزجاج خواصه العجيبة ويتجسد فهي نحو 594°C . وتختلف درجات الحرارة آفة الذكر باختلاف تركيب الخلطة الزجاجية •

تنوع آفران صهر الخلطات الزجاجية فمنها البدائية اليدوية ومنها الافران ذات التقنية العالية والتي تستخدم في صناعة المصاييح الكهربائية وغيرها كالأفران الرصاصية والمنغيزية ... الخ • وبعد أن يتم صهر الخلطة الزجاجية المناسبة تغرف من الفرن كمية المصهور الزجاجي المطلوبة وتعامل إما بالضغط أو بالنفخ أو بالسحب وذلك تبعاً لنوع الزجاج المراد الحصول عليه وشكله •

وتتألف خلطة الزجاج بصفة عامة من السيليكا ومواد قلوية وبعض العناصر المثبتة مثل الكلس والرصاص والباريوم • فمثلاً يتكون زجاج الاواني والألواح الزجاجية وزجاج النوافذ من مجموعة الأكاسيد التالية: SiO_2 و Al_2O_3 و CaO و Na_2O • أما الزجاج الخاص (الزجاج الليفي) فإن تركيبه يشبه تركيب الزجاج العادي مضافاً إليه بعض الأكاسيد مثل : B_2O_3 و ZnO و K_2O و As_2O_3 و PbO • وأما الزجاج الملوّن فيشبه تركيبه أيضاً تركيب الزجاج العادي إلا أن الأكاسيد المضافة في هذه الحالة هي : أكاسيد الحديد والنحاس والكوبالت والكروم •

٩-٢-٢ - أنواع الزجاج : تتعدد أنواع الزجاج وذلك تبعاً لتركيبه ومجالات استخدامه ونورد فيما يلي بعضاً من أنواع الزجاج شائعة الاستخدام :
١ - زجاج النوافذ : وتتكون خليطته من الصودا والكلس والسيليكا ،

بينما يبقى الداخل ساخناً وذلك أثناء انتاج هذا النوع من الزجاج • وتؤدي هذه ويمكن أن يصل عرض لوح الزجاج الواحد إلى ستة أقدام ، وتصنع هذه الألواح عادةً بسماكتين هما $(\frac{1}{6} \text{ in} \text{ و } \frac{1}{8} \text{ in})$.

٢- الزجاج العاكس : وهو الزجاج المطلي بطلاء عاكس • وتختلف نفاذية الأشعة الضوئية عبر هذا الزجاج باختلاف نوع الطلاء المستعمل وتتراوح بين ٨٠-٥٠٪ .

٣- الزجاج البورسيليكى : وهو من أقدم أنواع الزجاج ويستعمل بمقاومة عالية للحرارة وللصدمات ، ويستخدم في صناعة المصابيح والوانى المخبرية وأدوات المطبخ وغيرها •

٤- الزجاج الألومين سيليكى : يشبه في تركيبه الزجاج البورسيليكى مع بعض الإضافات ، وتحمل هذا الزجاج درجات الحرارة العالية ويستعمل في صناعة أدوات المطبخ والمصابيح وغيرها • وعند طلائه فإنه يستعمل كعناصر مقاومة في الدارات الالكترونية •

٥- الألواح الزجاجية والزجاج المصقول : ويشبهان زجاج النوافذ من حيث التركيب ، ويمكن أن يصل عرض اللوح الواحد في هذه الحالة الى ١٥ قدماً ، وتصنع هذه الألواح بسماكات مختلفة ويتم صقلها من الوجهين ولو أن درجات الصقل تختلف بين حالة وأخرى تبعاً للغرض •

٦- زجاج الأمان : ويتألف من طبقتين من الألواح الزجاجية يتم لصقهما ببعضهما بواسطة طبقة من مادة عضوية خاصة ، ويمكن الحصول على زجاج أمان بسماكات مختلفة ويستعمل في زجاج النوافذ العادية ونوافذ غرف المحاسبة في البنوك وغيرها •

٧- الزجاج المقسى : وتبلغ سماكته (1 in) ويستعمل هذا الزجاج بمثابة ميكانيكية عالية • ويتم الحصول على هذه المتانة بإجراء التبريد السريع للسطوح

العملية أيضا الى جعل الزجاج مقاوما للصدمات •

٨ - الزجاج الشريطي: وهو الزجاج الذي مدت بداخله أسلاك دقيقة جدا من الحديد • وييدي هذا الزجاج مقاومة أكبر بمرة ونصف المرة من مقاومة الزجاج العادي • ويسكن السير بالاقدام حتى على الألواح الرقيقة من هذا الزجاج • وعند تعرضه للكسر فإنه لا يتحطم الى قطع صغيرة كالزجاج العادي • ويتحمل هذا الزجاج الصدمات ودرجات الحرارة العالية ويستعمل في صناعة الأبواب والجدران المانعة لانتشار الحريق وفي أماكن أخرى •

٩ - الزجاج المضغوط : ويتم الحصول عليه بعاملة الزجاج (الذي تم جعله ليناً بالتسخين) بضغط معينة • ويستعمل هذا الزجاج في صناعة أدوات المائدة والعدسات والعوازل وغيرها •

٩-٢-٣ - أهم الخواص الفيزيائية للزجاج : إن من أهم الخواص الفيزيائية للزجاج خاصتين هما :

١ - اللزوجة : كي تتمكن من القيام بأي خطوة من خطوات صهر الزجاج وتصنيعه يجب أن تأخذ بعين الاعتبار هذه المقاومة للانسياب والحركة في درجات الحرارة المختلفة وذلك عند تطبيق قوى مختلفة عليه • وتدعى هذه المقاومة للحركة والانسياب باللزوجة ويعبر عنها كسا هو معروف بوحدة البواز (poise) والتي تعرف بأنها القوة اللازمة لإنجاز حركة قص على واحدة المساحة من الزجاج • ويمكن التمييز بين لزوجة أنواع الزجاج المختلفة عند درجة حرارة معينة بالرجوع الى منحنيات اللزوجة الموجودة في المراجع المختصة •

٢ - التمدد الحراري : يعبر عن خاصية التمدد الحراري للزجاج من خلال معامل التمدد الحراري والذي يشير إلى معدل تمدد الزجاج بين الدرجة 0°C والدرجة 300°C . ولقد ثبت تجريبياً أن الزجاج لا يتمدد بشكل متجانس خلال كل مجال من مجالات درجات الحرارة •

٩ - ٢ - اللدائن (البلاستيك) :

تعرف اللدائن (البلاستيك) على أنها مواد تركيبية الصنع يتم تحويلها بطرق البلمرة وبمساعدة الوسائط الكيميائية الى مركبات على شكل بودرة أو حبيبات أو صفائح أو موائع ثم تحول هذه المركبات الى منتجات مختلفة .

ويتميز البلاستيك عن غيره من المواد الأخرى بمجموعة من المزايا أهمها : خفة الوزن وسهولة التصنيع وقلة الهدر الصناعي وانخفاض الكلفة في إنتاجه . كما يمكن انتاج وتحسين انتاج أصناف كثيرة منه وذلك من خلال تغيير بسيط في نوعية المواد المضافة وكميتها وتلائم هذه الأصناف جميع الاحتياجات وتتمتع بالخواص المطلوبة منها . فمن المواد البلاستيكية ماهو قاس ومتين ومنها ماهو مرن ومنها ماهو لدن جداً . الخ . ولقد اتجه العالم كله في الوقت الحاضر الى تطوير تصنيع وإنتاج المواد البلاستيكية التي تستخدم في مختلف نواحي الحياة ابتداءً من الأواني المنزلية والصناعات الكهربائية الخفيفة وانتهاءً بالأجزاء الكبيرة والمعقدة في البحرية والطيران والفضاء . وأصبح اليوم مقدار ما يستهلكه الفرد الواحد من المواد البلاستيكية سنوياً هو أحد المعايير التي تحدد درجة رقي البلد .

٩ - ٢ - ١ - بنية البلاستيك :

يتألف البلاستيك بشكل أساسي من البوليمير وهي مادة عضوية ترتبط جزيئاتها مع بعضها بأعداد كبيرة جداً لتشكل ما يُسمى الجزيئات المتعددة العالية، ويخلط هذا البوليمير مع بعض المواد المضافة بغية إكساب البلاستيك بعض الخواص المعينة أو تحسين خواصه . وقد يكون البوليمير بشكل سلاسل خطية تمتاز بلدونتها عند ارتفاع درجة الحرارة (كالبولي إيثيلين) أو بشكل تفرعات فراغية (كالباكليت) . أما المواد المضافة فهي عضوية أو عضوية معدنية أو معدنية

ونسبتها أقل بكثير من نسبة البوليمير الأساسي في المادة البلاستيكية ، وتتنوع تسمية هذه المواد المضافة بتنوع الهدف من إضافتها ومنها :

١ - الملدنات : وهي مواد تضاف بغية جعل البلاستيك طرياً ولدناً في درجات الحرارة السالبة ومنها مواد تضاف بهدف جعل البلاستيك سهل التصنيع والتشغيل .

٢ - المثبتات : وهي مواد تضاف للبلاستيك حتى يقاوم مفعول التأكسد أو التفكك الذري أو التحول بمرور الزمن سواءً بتأثير الحرارة أو الضوء أو الأشعة فوق البنفسجية حيث تقوم هذه المثبتات بامتصاص هذه الأشعة وتمنع انحلال المادة .

٣ - المواد الحجمية : وهي مواد رخيصة تخطط مع المواد البلاستيكية لخفض التكلفة الاقتصادية من جهة وللتغلب على الضمور الناتج عن تبريد كتلة المواد البلاستيكية (لأنها تشكل شبكة تحد من ضمور الكتلة) من جهة أخرى .

٤ - المواد الحافظة : وهي مواد تحد من تأثير بعض الآفات ونشاطها التي التي تؤثر في الخواص الميكانيكية للمواد البلاستيكية وعازليتها الكهربائية وتجانس ألوانها . وغالباً ما تكون الملدنات نفسها مواد حافظة .

٥ - مواد التقوية : وهي مواد تؤمن الارتباط الجيد بين مركبات البلاستيك وتتمتع بخواص جيدة مثل مقاومة الشد وخفة الوزن والخواص الكهربائية الجيدة أيضاً .

٦ - مواد مقاومة للكهربائية الساكنة : حيث تحد هذه المواد من أثر التفريغ الكهربائي الستاتيكي الذي يتزامن مع تصنيع البلاستيك في قوالبه ، إذ يؤدي الى التصاق الغبار الجوي على المنتجات البلاستيكية .

٧ - مواد معيقة للاشتعال : وهي مواد تكسب المنتج المصنع خاصية عدم سريان اللهب في جزيئاته القابلة للاشتعال .

٨ - مواد لمنع الالتصاق في تجويف القالب : وتوضع على سطوح القالب الداخلية لتمنع المنتج البلاستيكي من الالتصاق وتسهّل انزلاقه وخروجه من القالب . ويجب أن لا تؤثر هذه المواد في الشكل الخارجي للمنتج البلاستيكي وأن تتحمل درجات حرارة الانتاج .

٩ - الملونات : وهي مواد صبغية تستخدم بغية إكساب المنتج البلاستيكي اللون المطلوب . وتستعمل هذه المواد إما أثناء التصنيع في القالب أو أن تطلى بها حبيبات مادة البلاستيك الأولية قبل تصنيعها .

وهناك مواد مضافة أخرى مثل المواد المزلقة والمواد الرغوية والمواد المضادة للأكسدة ولكلٍ منها مهنة المحددة في اكساب المنتج البلاستيكي بعض المزايا الخاصة .

٩ - ٢ - ٢ - تصنيف البلاستيك :

هناك مجموعة من السمات التي يمكن اتباعها عند تصنيف البلاستيك كالتصنيف حسب التركيب الكيميائي أو حسب المنشأ (طبعيا أو اصطناعيا) أو حسب طريقة التحضير (بلاستيك محضر بعملية البلمرة أو بعملية التكثيف) وغيرها من السمات الأخرى . ولكن السمة الأساسية المتبعة في التصنيف هي السلوك الحراري ، إذ يصنف البلاستيك على أساس سلوكه الحراري إلى نوعين :

١ - البلاستيك اللدن حرارياً : ويتميز هذا النوع بأنه يلين عند رفع درجة حرارته بحيث يمكننا من إعطائه الشكل المطلوب بسهولة ، ثم يحافظ البلاستيك على هذا الشكل بعد تجمده وفي درجات الحرارة العادية . وهذا النوع قابل لإعادة التشكيل عدة مرات وذلك بتسخينه في كل مرة ويدعى البلاستيك القابل للعكس .

٢ - البلاستيك المستقر حرارياً : ويتميز هذا النوع بأنه لا يلين عند رفع درجة

حرارته بعد الانتهاء من المرحلة الأخيرة من إنتاجه ، إذ يأخذ هذا البلاستيك الشكل النهائي له مرة واحدة وذلك بإعداده عن طريق الكبس في قوالب ساخنة يتجمد فيها البلاستيك المستقر حرارياً ولا يلين بعدها بالتسخين ، ونود هنا أن نشوه الى أن أشهر أنواع البلاستيك اللدن حرارياً هي البولي إيثيلين والبولي فينيل كلوريد والبوليسترول والزجاج العضوي . أما أشهر أنواع البلاستيك المستقر حرارياً فهي البكالييت والجليفنتال وغيره .

٩-٣-٢ - الخواص الفيزيائية للبلاستيك :

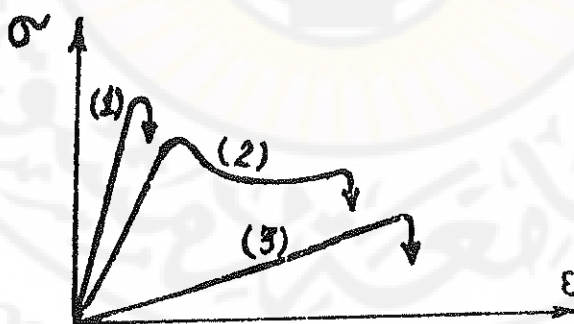
يتمتع البلاستيك بمجموعة من الخواص الفيزيائية مثل : خفة الوزن حيث يتراوح الوزن النوعي لجميع المنتجات البلاستيكية بين (٠.٦ - ٢.٥ غ/سم^٣) والشفافية ، إذ يكون البلاستيك الذي لا يحتوي على مواد مضافة وسماكته قليلة شفافاً وقابلاً لانتفاذ الضوء ، وخاصة التلوين حيث يمكن إعطاء البلاستيك اللون المطلوب بسهولة وبشكل متجانس . ولكن أهم الخواص الفيزيائية للبلاستيك هي :
١ - سرعة التجمد : يتميز البلاستيك بسرعة تحوله الى الحالة الجامدة بعد صبه أو حقنه في القالب . وتساعد هذه الخاصية على سرعة إنتاج البلاستيك وخفض الكلفة في إنتاجه .

٢ - العزل الكهربائي والصوتي والحراري : تتميز أنواع البلاستيك المختلفة (وبخاصة اللدنة حرارياً) بخاصية العزل الكهربائي والصوتي والحراري ، إذ أدى وجود خاصية العزل الكهربائي عند البلاستيك الى استخدامه بشكل هائل في صناعة العوازل الكهربائية . أما العزل الصوتي والحراري فالبلاستيك بحد ذاته يمنع انتقال الصوت والحرارة إلى حدٍ ما ولكن هذا العزل يرتفع الى مقدار مقبول عند صنعه بشكل اسفنجي ويحتوي على فقاعات داخلية متصلة أو مغلقة . ويكفي أن نقول إن ناقلية البلاستيك للحرارة تعادل على سبيل المثال نحو $\frac{1}{100}$ من ناقلية الحديد .

٣ - التقلص (أو الانكماش) : ويعبر عن التقلص بالفرق بين أبعاد المنتج البلاستيكي وأبعاد القالب الذي يحتوي هذا المنتج بعد صبه (أو حقنه) وتبريده الى درجة الحرارة العادية • ومن الضروري معرفة قيم التقلص عند كل نوع من أنواع البلاستيك بشكل دقيق وذلك بغية إدخال هذه القيم في الحسابات التصميمية للقوالب •

٩ - ٣ - ٤ - الخواص الميكانيكية للبلاستيك :

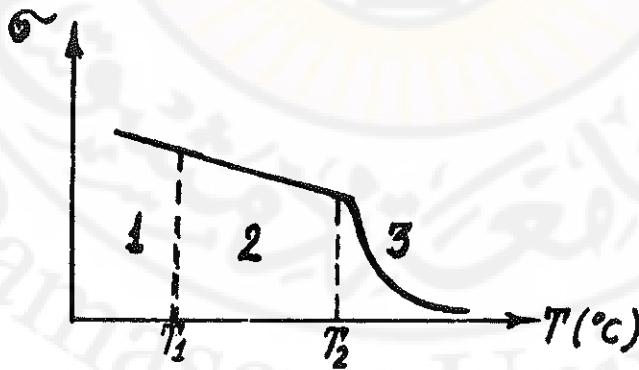
تتباين الخواص الميكانيكية للبلاستيك بين نوع وآخر وذلك تبعاً لتركيبه وحالته ونوع الحمل المطبق • فإذا أثرتنا في نماذج مختلفة من البلاستيك بإجهادات شد نلاحظ أن من بين هذه النماذج ما ينفلج بمقدار ١٠٠ - ٥٠٠٪ ومنها ما ينفلج بمقدار ٢ ÷ ٥٪ فقط وذلك قبل حدوث الانهيار • ويبيّن الشكل (٩ - ٢) ثلاثة منحنيات شد مختلفة فيما بينها لكلٍ من المواد البلاستيكية اللدنة والمستقرة حرارياً • فسن هذا الشكل نلاحظ أن المنحني (١) يبيّن أن مقدار الانفعال الذي يسبق الانهيار الكامل للعينة البلاستيكية صغير ويدعى هذا المنحني بالمنحني الذي يوافق



الشكل (٩ - ٢) : منحنيات الشد لأنواع مختلفة من البلاستيك اللدن والمستقر حرارياً •

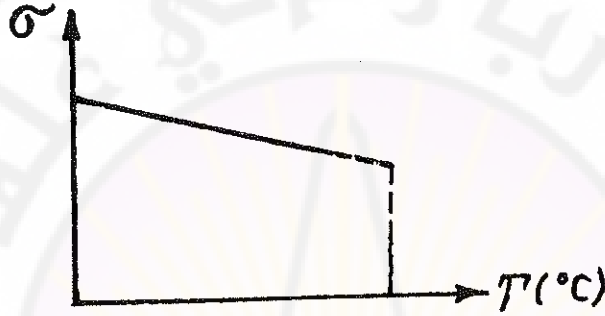
حالة الانفعال الهش للبلاستيك ، أما المنحني (2) فيوافق حالة الانفعال اللدن ، إذ كما نلاحظ من الشكل يكون مقدار الانفعال كبيرا جدا قبل حدوث الانهيار الكامل للعينة ، وأما المنحني (3) فيوافق حالة الانفعال المطاطي (كما يُسمى عادة) .

تؤثر درجة الحرارة في قيم الإجهاد المسبب للانهيار للصنف نفسه من البلاستيك . فن الشكل (٣-٩) نلاحظ أنه تم تقسيم منحني تغير إجهاد الانهيار بتغير درجة حرارة عينة مصنوعة من البلاستيك اللدن حراريا الى ثلاث مناطق ، حيث نميز على المنطقة الأولى أن العلاقة بين تغير إجهاد الانهيار وتغير درجة حرارة العينة البلاستيكية هي علاقة خطية ، ويتميز الانهيار الحاصل في هذا المجال من درجات الحرارة بأنه انهيار ذو سلوك هش . وفي المنطقة الثانية تبقى العلاقة بين تغير إجهاد الانهيار وتغير درجة حرارة العينة البلاستيكية علاقة خطية تقريبا ، ولكن الانهيار الحاصل في المجال الحراري من T_1 الى T_2 هو انهيار ذو سلوك لدن . وعندما تصبح درجة حرارة العينة أعلى من T_2 تنخفض قيم إجهاد الانهيار الى حد كبير وسلوك الانهيار مطاطي (كما يُسمى عادة) .



الشكل (٣ - ٩) : علاقة إجهاد انهيار البلاستيك اللدن حراريا بدرجة الحرارة.

أما بالنسبة للبلاستيك المستقر حراريا فان تأثير درجة الحرارة في اجهاد الانهيار قليل ، ذلك لأن الروابط الموجودة بين جزيئات هذا الصنف من البلاستيك قليلة التأثير بالحرارة غير المرتفعة (حتى ٣٠٠ - ٤٠٠ °م) وبسبب آخر يبقى تأثير الحرارة ضعيفا حتى يحدث تحلل البلاستيك وتضعف الروابط بين جزيئاته . ومن



الشكل (٩ - ٤) : علاقة اجهاد انهيار البلاستيك المستقر حراريا بدرجة الحرارة .

الشكل (٩ - ٤) نلاحظ أن العلاقة بين تغير اجهاد الانهيار لعينة من البلاستيك المستقر حراريا وتغير درجة الحرارة هي علاقة خطية إلا أن إجهاد الانهيار لا يتناقص بشكل كبير قبل حدوث انهيار البلاستيك المستقر حراريا المسخن الى درجات حرارة معينة كما في البلاستيك اللدن حراريا .

أما فيما يتعلق بخواص البلاستيك الميكانيكية الأخرى كمقاومة الصدم والتعب فانه يمكننا القول ان أغلب أنواع البلاستيك تتمتع بمقاومة عالية للصدم ومقاومة وسطى للاجهادات الترددية ونادرا ما يحدث في البلاستيك انهيار مفاجئ ناتج عن تعرضه لقوى صدم أو لإجهادات تعب ، كما يمكن تحسين هذه الخواص في البلاستيك بإضافة نسبة معينة من المواد المناسبة لخليطة البلاستيك .

* * *



جدول المصطلحات العلمية

مرتبة حسب ابجدية اللغة الانكليزية

بالانكليزية	بالفرنسية	بالعربية
— A —		
Absorption	Absorption	امتصاص
Allotropic transformations	Transformations allotropiques	التحولات الالوتروبية (الطورية)
Alloy	Alliage	خليطة
Alloy Steels	Aciers alliés	الفولاذ السبائكي
Annealing	Recuit	احماء (تخمير)
Austenite	Austenite	اوستنيت
— B —		
Body centred lattice	Réseau centré	الهيكل البلوري ذو التمرکز الوسطي
Brass	Laiton	النحاس الاسفر
Bronze	Bronze	البرونز
Brittleness	Fragilité	هشاشة
— C —		
Carbon Steel	Acier non allié	الفولاذ الفحمي
Cast iron	Fonte	حديد صب
Cathode	Cathode	مهبط
Cementite	Cémentite	سمنتيت

بالانكليزية	بالفرنسية	بالعربية
Charactereristic ray	Rayon caracteristique	الاشعة المميزة
Contruction	Striction	اختناق
Constantan	Constantan	الكونستنتان
Copper	Cuivre	النحاس
Corrosion	Corrosion	التأكسد (التآكل بالتأكسد)
Creep	Fluage	الزحف
Creep Strengthe	Resistance au fluage	مقاومة الزحف
Crystal lattice	Réseau	الهيكل الشبكي للبلورة
Curie point	Point de Curie	نقطة كوري (للتحويل المغناطيسي)

— D —

Degree of freedom	Dégré de liberté	درجة الحرية
Dendritic Structure	Structure dendritique	البنية الدندريكية (الفصينية)
Diamagnetism	Diamagnétisme	ديامغناطيسي
Diffussion	Diffusion	الانتشار
Dislocation	Dislocation	انخلاع
Ductility	Ductilité	الليونة (قابلية التشكيل)
Dynamic tests	testes dynamiques	الاختبارات الديناميكية

— E —

Elasticity	Elasticité	المرونة
Elastic Deformation	Déformation elastique	التغير المرن (التشوه المرن)
Elastic Limit	Limite d'élasticité	حد المرونة
Endurance Limit	Limite d'endurance	حد الصمود
Equilibrium diagrams	diagrammes d'équilibre	مخططات التوازن

بالانكليزية	بالفرنسية	بالعربية
Etching	Attaque	التخريش
Eutectic point	Point eutectique	النقطة اليوتكتيكية
Eutectoid point	Point eutectoïde	النقطة اليوتكتويدية
Extrapolation	Extrapolation	التقريب الخارجي

— F —

		الهيكل الشبكي ذو
Face Centred Lattice	Réseau faces centrées	التمركزات الوجهية
Fatigue	Fatigue	التعب
Fatigue Strength	Résistance à la fatigue	مقاومة التعب
Fatigue Limit	Limite de fatigue	حد التعب
Ferrite	Ferrite	الفريت
Ferromagnetic	Ferromagnétique	فرومغناطيسية
Fracture	Fracture	كسر ، تحطم
Free energy	Énergie libre	القدرة الحرة

— G —

Gibbs phase rule	La règle des phases de Gibbs	قاعدة الطور لجيبس
Grain boundaries	Frontières des grains	حدود الحبيبات
Grain growth	Croissance du grain	نمو الحبيبات
Grain size	Grosseur du grain	حجم الحبيبات

— H —

Hardenability	Tremnabilité	قابلية التقسية
Hardening	Trempe	التقسية

بالانكليزية	بالفرنسية	بالعربية
Hardness	Dureté	القساوة
Heat treatment	Traitement thermique	المعالجة الحرارية
Homogeneous	Homogène	متجانس
Heterogeneous	Hétérogène	غير متجانس
Hysteresis Loop	Cycle d'hystérésis	منحني الهسترة
Hypereutectic	Hypereutectique	فوق يوتكتيكي
Hypereutectoid	Hypereutectoïde	فوق يوتكتويدي
Hypoeutectic	Hypoeutectique	تحت يوتكتيكي
Hypoeutectoid	Hypoeutectoïde	تحت يوتكتويدي

— I —

Impact	Impact , choc	الصدمة
Induction	Induction	التحريض
Intercrystalline	Inter cristalline	بين البلورات
Interference	Intervention	تداخل
Interpolation	Interpolation	التقريب الداخلي
Interstitial Solutions	Solutions interstitielles	المحاليل التداخلية

— M —

Martensite	Martensite	المارتنسيت
Metastable	Metastable	متوازن توازنا حرجا
Miller Indices	Indices de Miller	اشارات ميلار
Monochromatic	Monocromatique	وحيد اللون

— N —

Neutral	Neutre	معتدل
---------	--------	-------

بالانكليزية	بالفرنسية	بالعربية
Notch	Encoshe	حز ، ثلثة
Nucleus	Noyau	نواة

— P —

Paramagnetic	Paramagnetique	بارامغناطيسية
Parameters	Parametres	مقاييس ، ابعاد
Pearlite	Perlite	البرليت
Peritectic	Péritectique	البريتكتيكي
Phases	Phases	اطوار
Polishing	Polissage	تلميع
Phase transformations	Tronsformations des phases	التحولات الطورية
Planck's Constant	Constante de Planck	ثابت بلانك
Plastisity	Plastisité	اللدونة
Plastic Deformation	Déformation Plastique	التغير اللدن
Proeutectic	Proeutectique	قبل يوتكتيكي
Proeutectoid	Proeutectoide	قبل يوتكتويدي
Proportional Limit	Limite de proportionnalité	حد التناسب

— Q —

Quantum Theory	Théorie des quanta	النظرية الكمية
Quantum Numbers	Nombres quantiques	الارقام الكمية للإلكترونات

— R —

Recrystallisation	Recristallisation	اعادة التبلور
Reversible	Réversible	ظاهرة قابلة للانعكاس

بالانكليزية	بالفرنسية	بالعربية
Rontgen rays	Royons de Rontben	اشعة رونتجن (الاشعة السينية)
Rupture	Rupture	انقطاع ، تحطم
— S —		
Segregation	Ségrégation	الانفصال الصلب . الترسيب
Slip Planes	Plans des glissements	مستويات الانزلاق
Softness	Tendresse	الطراوة
Solidification	Solidification	التصلب
Solid Solutions	Solutions solides	المحاليل الصلبة
Spectrum	Spectre	طيف
Stable	Stable	متوازن ، مستقر
Strain Hardening	Durcissement	التقسية بالتشكيل (بالانفعال)
Strength	Force, résistance	مقاومة
Stress	Effort	اجهاد
Substitutional	Substitutional	تبادلي
Super cooling	Super refroidissement	التبريد
Surface hardening	Durcissement de Surface	التقسية السطحية
— T —		
Thermal fatigue	Fatigue thermique	التعب الحراري
Toughness	Tenacité	المتانة
Transformation	Transformation	تحول ، تغير
— U —		
Ultimate tensile strength	Contrainte maximum à la traction	الحد الاعظمي لمقاومة الشد

بالانكليزية

بالفرنسية

بالعربية

— W —

Wohler Test

Teste re Wohler

اختبار فولر

— Y —

Yield point

Point de fléchissement

حد الانسياب ،

Young's Modulus

Module d'young

حد الاستسلام

عامل يونغ



المراجع

المراجع العربية :

- ١- المعادن « خواصها - اختباراتهما - معالجتها الحرارية » : د. جميل ابو جهجاه ، مطبعة دار الحياة ، دمشق ، ١٩٨١ .
- ٢- خواص المواد واختبارها : م. محمد عدنان فرواتي ، منشورات جامعة حلب ، ١٩٨٥ .
- ٣- البلاستيك وآلاته : د. معتز جاويش ، مطبعة خالد بن الوليد ، ١٩٨٩ .
- ٤- علم المعادن الفيزيائية : د. احمد سالم الصباغ ، منشورات مكتبة اسكندرون ، حلب .
- ٥- علم المعادن والمعاملة الحرارية للمعادن : يو. لاختين ، دار مير للطباعة والنشر ، موسكو ١٩٨٣ م
- ٦- البحث في مقاومة الانشاءات اللحامية الفولاذية عالية المتانة للتصدع التعبى والهش : د. محمد علي سلامة ، اطروحة للحصول على لقب دكتور فلسفة في العلوم التقنية ، لينينغراد ١٩٨٢ .

المراجع الأجنبية :

- 7- Туляев А.П. «Металловедение» - изд. Металлургия, М., 1977.
- 8- Школьская М.П. «Кристаллография» - изд. Высшая школа, М., 1976.
- 9- Козаев В.П. «расчеты на прочность при напряжениях, перешенных во времени» - изд. Машиностроение, 1977.
- 10- Труфяков В.М. «Усталость сварных соединений» - изд. Научкова думка, Киев, 1973.
- 11- Прохоров Н.Н. «Физические процессы в металлах при сварке» - изд. Металлургия, М., 1976.
- 12- «Сопротивление Материалов» - Г.С. Писаренко и др., изд. «Вища школа», Киев, 1979.
- 13- Степин П.А. «Сопротивление Материалов» - изд. Высшая школа, М., 1979.
- 14- Саламе М.А. и др. «Установка для испытания сварных соединений на усталость в автоколебательном режиме» - электротехническая промышленность, сер. электросварка, 1982.

الفصل الخامس : بنية الخلائط المعدنية

- ١٢٣ ١-٥- المزيج الميكانيكي
 ١٢٤ ٢-٥- المركب الكيميائي
 ١٢٧ ٣-٥- محلول معدني صلب قاعدته احد عناصر الخليطة
 ١٣١ ٤-٥- محلول معدني صلب قاعدته مركب كيميائي
 ١٣٣ ٥-٥- المحلول المعدني الصاب المنتظم
 ١٣٥ ٦-٥- المركبات الالكترونية
 ١٣٦ ٧-٥- المركبات الكيميائية المعقدة
 ١٣٨ ٨-٥- المركبات التداخلية (الأطوار التداخلية)
 ١٣٩ ٩-٥- قاعدة الطور

الفصل السادس : مخططات توازن الخلائط المعدنية

- ١٤٢ ١-٦- ملاحظات عامة حول انشاء مخطط التوازن
 ١٤٤ ٢-٦- كيفية إنشاء مخطط التوازن تجريبياً
 ١٥٠ ٣-٦- الاستنتاجات الممكنة من مخطط التوازن
 ١٥٦ ٤-٦- قانون العتلة واستخداماته في مخططات التوازن
 ١٥٩ ٥-٦- مخططات التوازن النظرية
 ١٨٣ ٦-٦- مخططات التوازن الخلائط التي تتمتع مكوناتها بتغيرات ألوتروبية

الفصل السابع : اهم الخواص الفيزيائية للمعادن والخلائط المعدنية

- ١٩١ ١-٧- الوزن النوعي للمعادن والخلائط المعدنية
 ١٩٣ ٢-٧- الخواص الحرارية للمعادن والخلائط المعدنية
 ١٩٣ ١-٢-٧- الحرارة النوعية
 ١٩٥ ٢-٢-٧- الحرارة النوعية الدرجة

الصفحة	الموضوع
١٩٥	٧-٢-٣- حرارة الانصهار
١٩٦	٧-٢-٤- حرارة التغير الألوتروبي
١٩٦	٧-٢-٥- اختزان الحرارة
١٩٧	٧-٢-٦- التمدد الحراري
٢٠٠	٧-٣-٣- ناقلية الكهرباء والحرارة عند المعادن والخلائط المعدنية
٢٠٠	٧-٣-١- ناقلية المعادن النقية للتيار الكهربائي
٢٠٢	٧-٣-٢- تأثير الحرارة على ناقلية المعادن للتيار الكهربائي
٢٠٤	٧-٣-٣- تأثير التشكيل والتطرية على ناقلية المعادن للتيار الكهربائي
٢٠٤	٧-٣-٤- ناقلية الخلائط المعدنية للتيار الكهربائي
٢٠٧	٧-٣-٥- ناقلية المعادن والخلائط المعدنية للحرارة
٢٠٨	٧-٤- الخواص الكهروحرارية للمعادن والخلائط المعدنية
٢١١	٧-٥- الخواص المغناطيسية للمعادن والخلائط المعدنية
٢١٦	٧-٦- انتشار الذرات في المعادن والخلائط المعدنية
٢٢٠	الفصل الثامن : الخواص الميكانيكية للمعادن والخلائط المعدنية واختباراتها
٢٢	الاختبارات الستاتيكية
٢٢٢	٨-١- اختبار الشد
٢٢٢	٨-١-١- اختيار العينات
٢٢٣	٨-١-٢- الآلات المستخدمة في اختبار الشد
٢٢٥	٨-١-٣- قياس الانفعال
٢٢٥	الطريقة البسيطة
٢٢٥	الطريقة الميكانيكية
٢٢٧	الطريقة الكهربائية
٢٢٩	الطريقة الضوئية

٣٤٣	١٢- انكماش الخشب وتغير أبعاده
٣٤٣	٢- احتراق الخشب
٣٤٤	٤- القيمة الوقودية للخشب
٣٤٤	٥- ناقلية الخشب للحرارة ومعامل تمدده الحراري
٣٤٥	٦- ناقلية الخشب للكهرباء
٣٤٥	٧- ناقلية الخشب للصوت
٣٤٦	٩-١-٤- الخواص الميكانيكية للخشب
٣٤٧	٦-٢- الزجاج
٣٥١	٩-٢-١- تصنيع الزجاج
٣٥١	٩-٢-٢- أنواع الزجاج
٣٥٢	٩-٢-٣- أهم الخواص الفيزيائية للزجاج
٣٥٣	٩-٣- اللدائن (البلاستيك)
٣٥٣	٩-٣-١- بنية البلاستيك
٣٥٥	٩-٣-٢- تصنيف البلاستيك
٣٥٦	٩-٣-٣- الخواص الفيزيائية للبلاستيك
٣٥٧	٩-٣-٤- الخواص الميكانيكية للبلاستيك
٣٦٠	جدول المصطلحات العلمية
٣٦٧	المراجع العربية والأجنبية

* * *