منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

علم المواد

خواصها واختباراتها

الدكتور المهندس
جميل أبو جهجاه
كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية ـ جامعة دمشق

الدكتور المهندس
محمد علي سلامة
كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية ـ جامعة دمشق

الدكتور المهندس
فؤاد ضحية
كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية ـ جامعة دمشق

جامعة دمشق

١٤٣١ - ١٤٣٢ هـ
٢٠١٠ - ٢٠١١ م


وقل رب زدني علما
Damascus University

المقدمة

كثيرة" هي المواد المستخدمة في البحث العلمي ومجالات الصناعة المختلفة ، فالمواد سواء منها المعدنية وغير المعدنية كانت ومازالت الشغل الشاغل للإنسان منذ أن وُجِدَ على سطح الأرض ، إذ كان ومازال يبحث في هذه المواد ينقّب عنها ويدرس تركيبها وخواصها ويستخلصها من فلزاتها إذا كانت فلزية ويصنعّها ويطوّر 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 إلاّ القياصرة في تلك الأزمان • ولم يتوصل الباحثون وحتى هذا التاريخ إلى سر المعالجات الحرارية التي كانت تجرى 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 كتابٍ واحد ما توصلت إليه البشرية من دراسة مكثفة لخواص المواد وأنواعها وتقنية اختباراتها وتصميمها وتصنيعها • لهذا فان جُلّ عملنا قد انصب في هذا الكتاب على وضع المبادىء الاساسية 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 نستفض 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 هـذه تتميز بطفرة علمية كبيرة في مجال علم المواد وغيرها من العلوم الاخرى ، 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 . لهـذا فان هناك جزءاً من طرق الاختبار الحديثة لم تتطرق لها وجزءاً آخر تمت دراسته بشكل مختصر تاركين للطالب تطوير معرفته عندما تستدعي الضرورة لذلك .

المؤلفـون

* * *

الفصل الأول

تصنيف المعـادن وبنيتها الصلبة

١ ـ ١ ـ المعـادن :

تعرّف المعادن في علم الكيمياء على أنها مجموعة العناصر التي تتوضع في الجزء اليساري من الجدول الدوري للعناصر (انظر الجدول ١ ـ ١).فإذا دخلت عناصر هذه المجموعة في تفاعل كيميائي مع العناصر المعدنية فانالأولى تعطي للاخيرة الكتروناتها الخارجية (الكترونات التكافؤ) ذلك لأن هذه الالكترونات تكون في ذرات المعادن ضعيفة الارتباط بالنوى من جهة وعددها في المدارات الخارجيـةقليل (١ ـ ٣ الكترونات) من جهة أخرى ، بينما عـدد الالكترونـات في المدارات الخارجية لذرات اللامعادن كبير (٥ ـ ٧ الكترونات) .

وتعرّف المعادن في الصناعة على أنها المواد التي تتمتع بخاصيتي البريق المعدني واللدونة ولو أن درجات اللدونة تختلف من معـدن لآخر . ولقـد أعطى العالم السوفييتي لومونوسف تعريفاً للمعادن على أنها : « أجسامذات لمعان ويمكن طرقها» ولم يفقد هذا التعريف معناه منذ مئتي عام وحتى الآن . ولا تتوافر هاتان الخاصتان (اللمعان وقابلية الطرق)عند المعادن النقية مثل النحاس والألمنيوم والحديدوغيرها 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 خاصتي البريق المعدني واللدونة) بخاصية

الجدول (1.1): الجدول الدوري للعناصر (جدول أعمال السوفيتي مندليف د.ي)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	$H_{1.008}^{1}$ الهيدروجين															$He_{4.003}^{2}$ الهيليوم
2	$Li_{6.940}^{3}$ الليثيوم	$Be_{9.103}^{4}$ البريليوم	$B_{10.82}^{5}$ البورون									$C_{12.01}^{6}$ الكربون	$N_{14.008}^{7}$ النيتروجين	$O_{16.0}^{8}$ الأكسجين	$F_{19.00}^{9}$ الفلور	$Ne_{20.183}^{10}$ النيون
3	$Na_{22.997}^{11}$ الصوديوم	$Mg_{24.32}^{12}$ المغنزيوم	$Al_{26.97}^{13}$ الألمنيوم									$Si_{28.00}^{14}$ السيليسيوم	$P_{30.98}^{15}$ الفوسفور	$S_{32.064}^{16}$ الكبريت	$Cl_{35.457}^{17}$ الكلور	$A_{39.944}^{18}$ الأرجون
4	$K_{39.096}^{19}$ البوتاسيوم	$Ca_{40.08}^{20}$ الكالسيوم	$Sc_{45.10}^{21}$ السكانديوم	$Ti_{47.90}^{22}$ التيتانيوم	$V_{50.95}^{23}$ الفناديوم	$Cr_{52.01}^{24}$ الكروم	$Mn_{54.93}^{25}$ المنغنيز	$Fe_{55.85}^{26}$ الحديد	$Co_{58.94}^{27}$ الكوبالت	$Ni_{58.69}^{28}$ النيكل	$Cu_{63.54}^{29}$ النحاس	$Zn_{65.38}^{30}$ الزنك	$Ga_{69.72}^{31}$ الغاليوم	$Ge_{72.60}^{32}$ الجرمانيوم	$As_{74.91}^{33}$ الزرنيخ	$Se_{78.96}^{34}$ السيلينيوم	$Br_{79.91}^{35}$ البروم	$Kr_{83.7}^{36}$ الكريبتون
5	$Rb_{85.48}^{37}$ الروبيديوم	$Sr_{87.63}^{38}$ السترونتيوم	$Y_{88.92}^{39}$ الإيتريوم	$Zr_{91.22}^{40}$ الزركونيوم	$Nb_{92.91}^{41}$ النيوبيوم	$Mo_{95.95}^{42}$ الموليبدينوم	Tc_{99}^{43} التكنيتيوم	$Ru_{101.7}^{44}$ الروثينيوم	$Rh_{103.9}^{45}$ الروديوم	$Pd_{106.7}^{46}$ البالاديوم	$Ag_{107.88}^{47}$ الفضة	$Cd_{112.41}^{48}$ الكادميوم	$In_{114.78}^{49}$ الأنديوم	$Sn_{118.7}^{50}$ القصدير	$Sb_{121.76}^{51}$ الأنتيمون	$Te_{127.61}^{52}$ التيلوريوم	$I_{126.9}^{53}$ اليود	$Xe_{131.3}^{54}$ الكزينون
6	$Cs_{132.9}^{55}$ السيزيوم	$Ba_{137.36}^{56}$ الباريوم	$La_{138.92}^{57}$ اللانثانيوم	$Hf_{178.6}^{72}$ الهافنيوم	$Ta_{180.88}^{73}$ التنتاليوم	$W_{183.92}^{74}$ التنغستين	$Re_{186.3}^{75}$ الرينيوم	$Os_{190.2}^{76}$ الأزميوم	$Ir_{193.23}^{77}$ الإريديوم	$Pt_{195.23}^{78}$ البلاتين	$Au_{197.2}^{79}$ الذهب	$Hg_{200.61}^{80}$ الزئبق	$Tl_{204.39}^{81}$ الثاليوم	$Pb_{207.21}^{82}$ الرصاص	Bi_{209}^{83} البزموت	Po_{210}^{84} البولونيوم	At_{211}^{85} الأستاتين	Rn_{222}^{86} الرادون
7	Fr_{223}^{87} الفرانسيوم	$Ra_{226.05}^{88}$ الراديوم	Ac_{227}^{89} الأكتينيوم	Ku_{264}^{104} الكورتشاتوم														

مجموعة اللانثانيدات (مجموعة المعادن نادرة الوجود في الطبيعة)

$Ce_{140.13}^{58}$ السيريوم	$Pr_{140.92}^{59}$ البرازيوديوم	$Nd_{144.27}^{60}$ النيوديوم	Pm_{147}^{61} البروميثيوم	$Sm_{150.43}^{62}$ السامريوم	Eu_{152}^{63} اليوروبيوم	$Gd_{156.9}^{64}$ الغادولينيوم	$Tb_{159.2}^{65}$ التربيوم	$Dy_{162.46}^{66}$ الديسبروسيوم	$Ho_{164.94}^{67}$ الهولميوم	$Er_{167.2}^{68}$ الأربيوم	$Tm_{169.4}^{69}$ الثوليوم	$Yb_{173.4}^{70}$ الإربيوم	$Lu_{174.99}^{71}$ اللوتيسيوم

مجموعة الأكتينيدات (مجموعة المعادن المشعة)

$Th_{232.12}^{90}$ الثوريوم	Pa_{231}^{91} البروتاكتينيوم	$U_{238.07}^{92}$ اليورانيوم	Np_{238}^{93} النبتونيوم	Pu_{242}^{94} البلوتونيوم	Am_{243}^{95} الأمريسيوم	Cm_{245}^{96} الكوريوم	Bk_{249}^{97} البركليوم	Cf_{249}^{98} الكاليفورنيوم	Es_{253}^{99} الأينشتانيوم	Fm_{255}^{100} الفرميوم	Md_{256}^{101} المندليفيوم	No_{253}^{102} النوبليوم	Lr_{256}^{103} الورانسيوم

الناقلية الجيدة للكهرباء والحرارة . ويعود التفضل في الناقلية الجيدة للكهرباء والحرارة عند المعادن للالكترونات الخارجية الضعيفة الارتباط بالنوى والتي لايقتصر دورها على إحداث التفاعلات الكيميائية بين المعادن والعناصر غير المعدنية وإكساب المعدن صفة البريق واللدونة فحسب وانما يتعداها الى 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 (احداث فرق كمون مثلاً بين طرفي قطعة معدنية) فان حركة الالكترونات ستكون وفق اتجاه محدد ويظهر التيار الكهربائي . وهكذا نلاحظ أنه وعلى الرغم من وجود بعض الاختلاف في مفهوم المعدن كعنصر كيميائي والمعدن كمادة إلا أن هذين المفهومين مرتبطان بخواص البنية الداخلية لذرات المعدن . وقبل ان ندخل في تفاصيل البنية الداخلية للمعادن وذراتها لابد من التعرف على تصنيف المعادن وأهم الأسس المتبعة لإجراء مثل هذا التصنيف .

١ ــ ٢ ــ تصنيف المعادن :

يختلف كل معدن عن الآخر ببنيته وخواصه ، ومع كل هذا فانه طبقا لبعض الصفات يمكن دمج هذه المعادن في مجموعات كما هو اوضح من الجدول (١ــ٢). ويمكننا قبل كل شيء أن نقسم المعادن إلى مجموعتين كبيرتين هما :

آ ــ 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 مايمثل هذه المجموعة هو معدن الحديد .

ب ــ مجموعة المعادن الملونة : وتتميز معادن هذه المجموعة بألوانها ، ففيها الأحمر والأصفر والأبيض ، ولها لدونة عالية وقساوة منخفضة ودرجة انصهار منخفضة نسبياً ، وأفضل مايمثل هذه المجموعة معدن النحاس •

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

١ً ــ 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 •

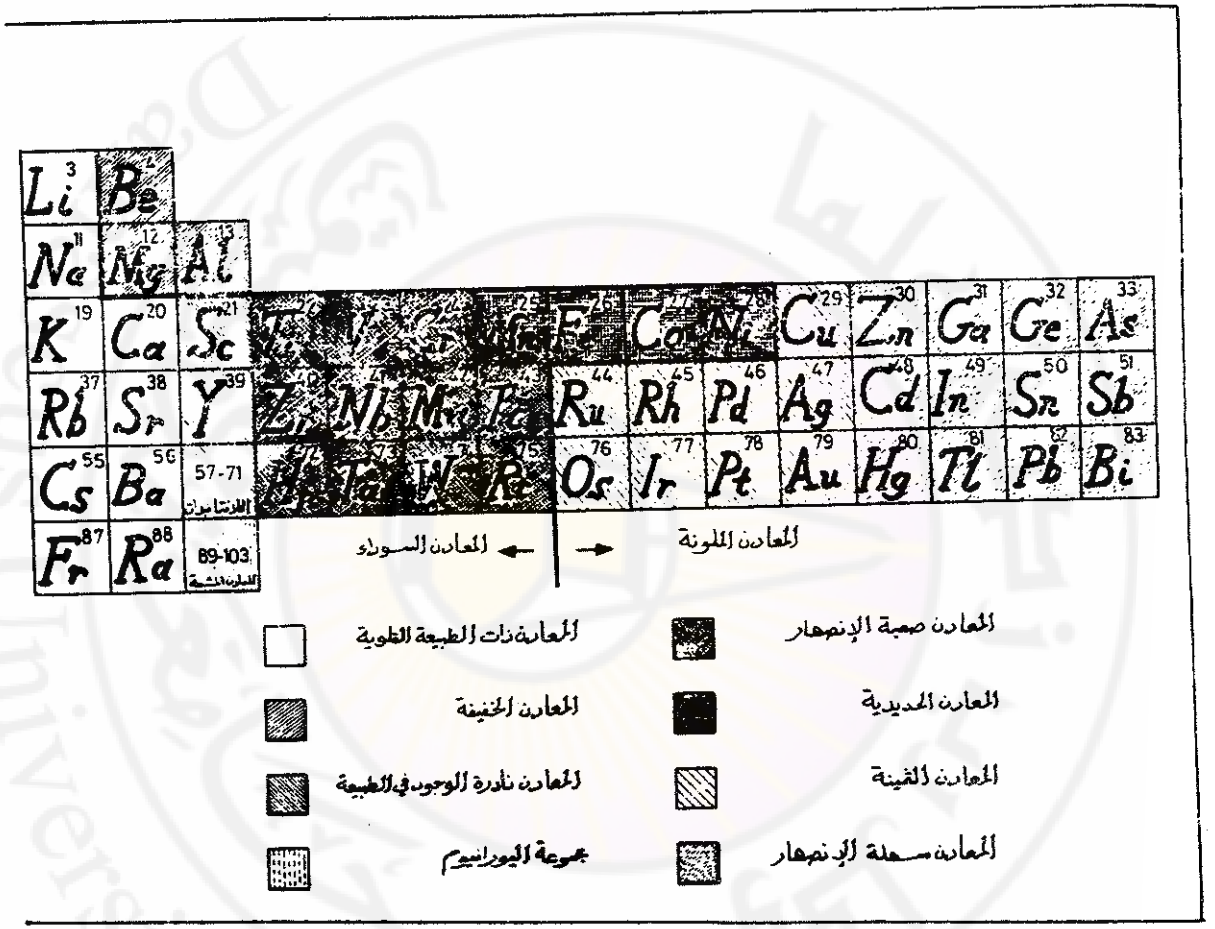
٢ً ــ المعادن صعبة الانصهار : وهي المعادن التي تكون درجة انصهارها أعلى من درجة انصهار الحديد النقي (أي أعلى من 1539 °C) • وتستخدم هذه المعادن كعناصر إضافة في الفولاذ السبائكي وكمعادن أساس عند صناعة خلائط من هذه المعادن •

٣ً ــ المعادن المشعة : وهي مجموعة اليورانيوم والنظائر • وتستخدم هذه المعادن عادةً في خلائط الطاقة الذرية •

٤ً ــ المعادن نادرة الوجود في الطبيعة : وهي اللانتانيوم والسيريوم والنيوديوم والبرازيديوم ••• الخ • وترد هذه المعادن جميعها تحت اسم مجموعة اللانتانيوم (أو اللانتانيدات) ، ويشبه معدنا الايتيريوم والسكانديوم 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

الجدول (١ ــ ٢) : تصنيف العادن إلى مجموعات



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

٥ً ـ 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 :

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

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

٣ً ـ المعادن سهلة الانصهار : وهي التوتياء والكادميوم والزئبق والقصدير والرصاص والبزموت والتاليوم والأنتيموان وعناصر لها خواص معدنية ضعيفة هي الغاليوم والجرمانيوم .

١ ـ 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 :

آ ـ النواة : تتألف النواة من عددٍ من الجسيمات بعضها ذات شحنات كهربائية موجبة وتسمى البروتونات (Protons) وبعضها الآخر لا يحمل أي شحنات كهربائية وتسمى النيترونات (Neutrons) ، وتربط مابين البروتونات والنيترونات جسيمات أخرى أصغر منها تُسمى الميسونات (Mesons) تتعادل كتلة البروتون مع كتلة النيترون تقريباً أما كتلة الميسون فتساوي ٢٠٠÷٣٠٠ مرة من كتلة الالكترون• وتشكل أوزان البروتونات والنيترونات 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 ـ أي بمقدار ماتحتوي عليه الذرة من البروتونات والالكترونات ، غير أن اختلاف عدد النيترونات بين نواة ونواةٍ أخرى للعنصر نفسه يؤدي الى تباين في الأوزان الذرية لذرات هذا العنصر ، لهذا تُسمى ذرات العنصر الذي يبقى فيها كل" من الرقم الذري والخواص الكيميائية بدون تغيير بينما تختلف فيما بينها بأوزانها الذرية النظائر (Isotopes) . يقدر قطر النواة بنحو $١٠^{-١٣} \div ١٠^{-١٢}$ سم وهو صغير جداً بالنسبة لقطر الذرة الكلي والذي هو من مرتبة الأنغستروم (أي $١٠^{-٨}$ سم)•

ب ـ 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 :

$$e = 4{,}802 \cdot 10^{-10} \text{ elect. st. u.} = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} \qquad (1.1)$$

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

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

حيث : N ـ عـدد الذرات في الذرة الغرامية الواحدة (ويسمى عادةً رقم أفوغادرو) .

F ـ شحنة الوزن المكافىء الغرامي الواحد لأي عنصـر وتساوي (96493 Coulomb) .

e ـ شحنة الالكترون .

أمـا ايجـاد قيمـة الشـحنة النوعيـة للالكتـرون تجـريبياً (أي أن : $\frac{e}{m_e} = 5{,}274 \cdot 10^{17} \frac{\text{elect.st.u.}}{\text{g}}$) فقد ساعد في حساب كتلة الالكترون :

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

وبما أن كتلة البروتون (أي كتلة ذرة الهيدروجين كون نواتها تحتـوي على بروتون وحيد ولا تحتوي على أيـة نيترونات) فهـي $m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-24}$ g فانه يمكننا أن نقول إن كتلة الالكترون تساوي $\frac{1}{١٨٣٦}$ من كتلة البروتون .

تتحرك الالكترونات حول النواة في نوعين من الحركة :

١ً ــ حركة دورانية حول النواة في مدارات دائرية أو بيضوية .

٢ً ــ حركة كل الكترون حول محوره .

ولقد عد العالم الفيزيائي راذرفورد (Rutherford)أن نظـام 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 :

$$\frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e \cdot V^2}{r} \qquad (1.4)$$

غير أن تصور راذرفورد هذا لم يكن كافياً لإبراز خواص الذرة كافـة أو تفسير بعض الظواهر مثل ظاهرة ثبات الذرة ، إذ من المعروف حسـب قوانـين الالكترودينامك أن كل جسم ذي شحنة كهربائية ويتحرك بسرعة متغيرة القيمـة 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 القبيـل 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 .

لقد أكمل العالم الفيزيائي بور (Bohr) تصور راذفورد السابق من خلال وضعه للنظرية الكمية للذرة والتي تتلخص في مبدأين اثنين :

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

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

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

حيث : n ـ رقم الغلاف ويساوي أعداداً صحيحة .

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

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

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

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

٢ ـ المبدأ الثاني لبور : ينتج اختلاف في قدرة الالكترون عنـد قفـزه من مدارٍ إلى آخر وتبدو هذه القدرة على شكل إشعاع . ولكن لمعرفة مقـدار القدرة المفقودة أو المكتسبة عند انتقال الالكترون من مدار إلى آخر يجـب أن نعرف مقدار القدرة الكامنة والقدرة الحركية للالكترون على كلٍ من المدارين، فالقدرة المختزنة للالكترون في المدار n هي العمل اللازم إنجازه لنقل الكترون من مدار واقع في اللانهاية الى المدار الذي نصف قطره r_n ، أي أن :

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

أما القدرة الحركية للالكترون فهي :

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

وهكذا فان القدرة الكلية للالكترون في المدار n هي :

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

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

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

فاذا فرضنا أن الالكترون سوف ينتقل من المدار (n + 1) الى المدار n فان مقدار القدرة التي يجب أن يفقدها على شكل إشعاع هي :

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

حيث : ν – تردد الإشعاع الناتج .

C – سرعة الإشعاع وتساوي عادةً $\left(C = 3 \cdot 10^{10} \frac{cm}{sec.}\right)$.

λ – طول موجة الإشعاع .

ومنه يمكن ايجاد قيمة تردد الإشعاع :

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

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

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

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 :

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

$$r_1 = 0{,}53 \cdot 10^{-8}\ cm \quad \text{و} \quad V_1 = 2{,}2 \cdot 10^{8}\ \frac{cm}{sec.} \ .$$

٢ً ــ لقد تبيَّن أن الالكترونات التابعة للمدار الرئيس الواحد ذي الرقم n غير متساوية تماماً بالقدرة المختزنة في كلٍ منها ويتعلق مقدار هذه القدرة بأربعة عوامل هي :

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

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

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

جـ ــ الرقم الكمي المغناطيسي : وهو الرقم الكمي الذي يميز تأثير الخواص المغناطيسية للالكترون في مقدار قدرته ، ويرمز لهذا الرقم بالرمز m ، ويمكن لهذا الرقم أن يأخذ قيماً 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 ــ 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 وتقيدنا بمبدأ باولي (Pauli) الذي ينص على أنه لا يمكن أن يكون لالكترونين أو أكثر الأرقام الكمية الأربعة نفسها ، لاستطعنا وبكل سهولة أن نتتبع كيفية توزع الالكترونات على الأغلفة الرئيسة والمدارات الثانوية التابعة لها .

١ ــ ٤ 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 للمادة لكان تحول الغاز الى بلازما يجب أن يتم حتى نهاية عملية التأين في درجة حرارة وضغط ثابتين وطبقا لنظرية الطور[1] لمجموعة ذات عنصر واحد ، وهذا مالايتم بالفعل كون هذا التحول ليس تحولاً طورياً .

تحافظ 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 أيضا بالتدريج ــ 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 .

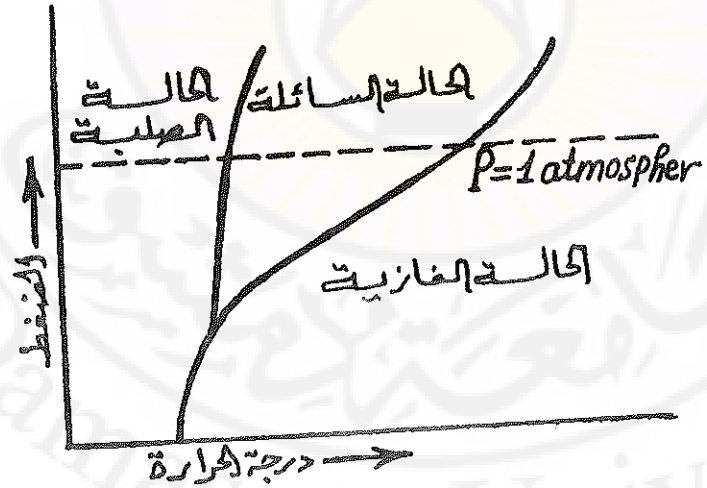
إن التحول من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة وبالعكس يتم عند درجة حرارة معينة ، وترافق هذا التحول تغيرات مفاجئة في الخواص . وينطبق هذا أيضاً على التحول من الحالة السائلة الى الغازية . والسؤال الذي يُطرح الآن هو: ما الفرق بين الحالات الغازية والسائلة والصلبة إذاً ؟ نحن نعلم أنه لا يوجد لتوضع جزيئات الغاز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

---

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

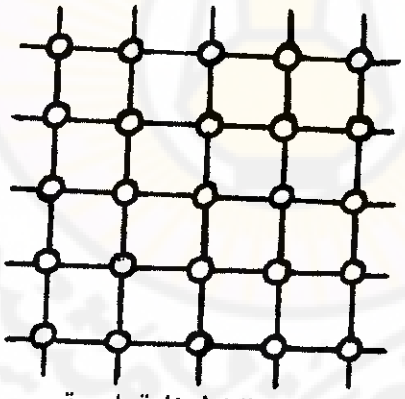
فان نظام توزيع الذرات محدد وقانوني ، إذ تتساوى قوى التجاذب والتنافر بين الذرات ، ولهذا يحافظ الجسم الصلب على شكله • أما في السوائل فان الذرات (أو الجزيئات) تحافظ على ما يُسمى أقرب انتظام لها — أي أنه تتوضع عادةً وبشكل منتظم كمية غير كبيرة من الذرات في الفراغ ، ويكون عدد الذرات هذه أقل منها عند الجسم 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 مايميز البنية البلورية • ولذا يتساوى في علم الفيزياء مفهوما الحالة البلورية والحالة الصلبة للمادة ، إذ تعد المواد الأمورفية (مثل الزجاج) مواد سائلة بردت تبريداً مفرطاً •



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 بوساطة الاشعة السينية وأصبح من المسلم به أن كل معدن مهما اختلفت ظروفه فانه في درجات الحرارة الواقعة تحت درجة انصهاره يكون ذا بنية بلورية أي أن ذرات أي معدن في الحالة الصلبة تكون منتظمة الى جانب بعضها على مسافات ثابتة وبأشكال هندسية محددة ومنتظمة تكرر نفسها بالاتجاهات الثلاثة لتشكل 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 بتراصفها الى جانب بعضها بعضا في مختلف الاتجاهات ، اذن 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 يتمركز فيها وزن الذرة كاملاً تقريبا ويدور حولها عدد من الالكترونات على مدارات مختلفة • لذلك فعندما نحدد مكان الذرة في الهيكل الشبكي نكون قد حددنا

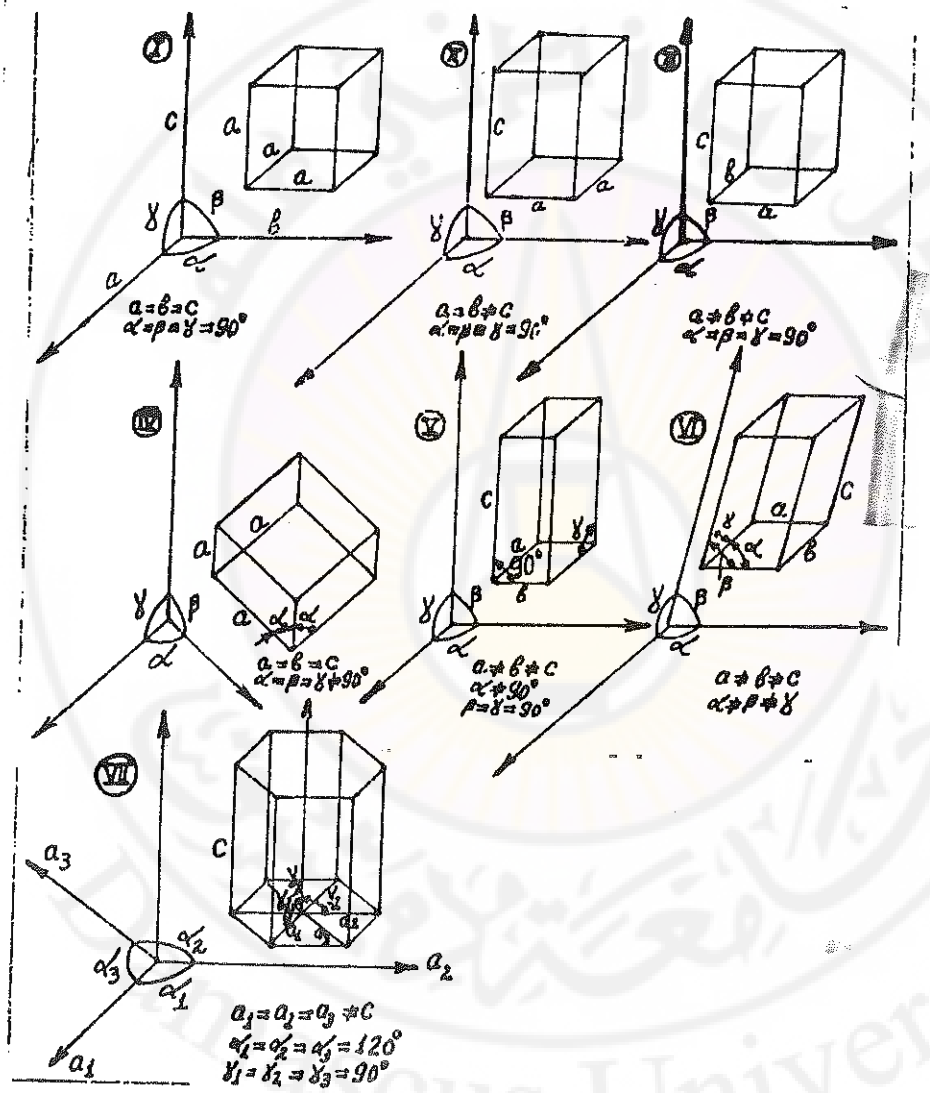
المكان الذي تتمركز فيه نواة الذرة . ولكن يجب أن لايتبادر إلى أذهاننا أن هذا التحديد لأماكن الذرات في الهياكل الشبكية يعني أن الذرات أو بالأحرى نوى هذه الذرات ثابتة ومستقرة في أماكنها هذه كقطع الطوب في الجدار بدون أدنى حركة لأن الذرة بمجموعها أي النواة ومايتبعها من الكترونات تكون في حركة اهتزازية دائمة بسبب الحركة الدورانية للالكترونات ، 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 ــ ٥ الهياكل الشبكية للمعادن :

لقد ذكرنا سابقاً أن أهم مايميز 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 مايمكن 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 . ويُبين الشكل (١ ــ ٣) كيف تتوضع الذرات في عقد مستو يسمى المستوي البلوري ، ويشكل تكرار المستويات البلورية الموازية لبعضها بعضا مايسمى الهيكل الشبكي في الفراغ ، حيث تعد عقد هذا الهيكل أمكنة لتوضع الذرات ، وتقاس المسافة بين مراكز الذرات المتجاورة


I
II
III
IV
V
VI
VII
a=b=c
α=β=γ=90°
a=b≠c
α=β=γ=90°
a≠b≠c
α=β=γ=90°
a≠b≠c
α≠90°
β=γ=90°
a≠b≠c
α≠β≠γ
a1=a2=a3≠c
α1=α2=α3=120°
γ1=γ2=γ3=90°

شکل (۱ ـ ۳)

بالأنغستروم ($1\ A^{\circ} = 10 \quad cm$) .

وللمقارنة بين أنواع الهياكل الشبكية المختلفة نأخذ مجموعة محاور احداثية ثلاثية ونرسمها 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 بعضا من جهة أو عدم تساويها وبتساوي الاطوال المأخوذة على هذه المحاور من جهة ثانية أو عدم تساويها يمكن أن نميز بين سبعة أنواع رئيسة من الهياكل الشبكية :

آ ــ المكعب (Cubic) ــ انظر الشكل (١ ــ ٣ I) .

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

ب ــ الشكل الرباعي (Tetragonal) ــ انظر الشكل (١ ــ ٣ II) .

يختلف فيه الارتفاع عن البعدين الآخرين المتساويين وزواياه الثلاث قائمة، أي :

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

جـ ــ متوازي المستطيلات (Orthorhombic) ــ انظر الشكل (١ــ٣ III) حروفه الثلاثة مختلفة إلا أن زواياه متساوية وقائمة أي :

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

د ــ الموشور المعيني (Rhombohedral) ــ (انظر الشكل (١ ــ٣ 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 ــ أحادي الميل (Monoclinic) ــ انظر الشكل (١ ــ ٣ ــ 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 ــ ثلاثي الميل (Triclinic) ــ انظر الشكل (١ ــ ٣ VI) •

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

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

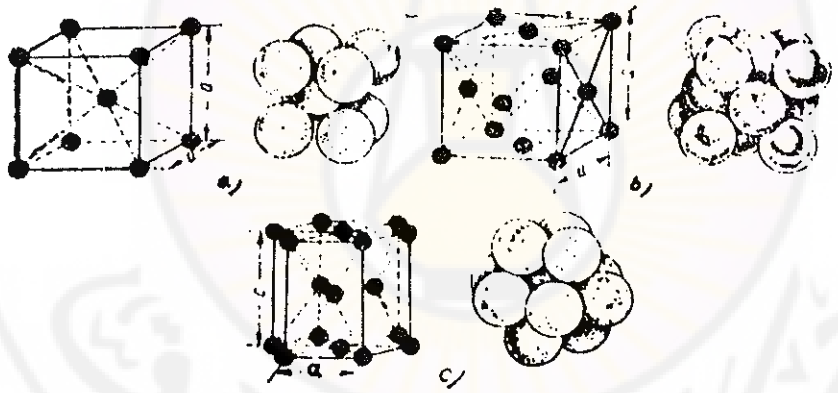
ز ــ الموشور السداسي المنتظم (Hexagonal) ــ انظر الشكل (١ ــ ٣ ــ VII) •

وهو الشكل الهندسي ذو القاعدة السداسية المنتظمة والذي تكون حروفه عمودية على مستوى القاعدة ويميز عادة بأربعة محاور بدلاً من ثلاثة ، ثلاثة منها في مستوٍ أفقي (مستوي 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 تقريباً حسب أحد ثلاثة أشكال رئيسة من بين السبعة السابقة وهي :

١ً ــ المكعب : وتتمركز الذرات في هذا الهيكل بأحد ثلاثة أشكال ، فإما 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 بالاضافة للذرات الثماني المتمركزة في رؤوسه ويسمى المكعب المتركز حجميا (شكل ١ ــ ٤ a) ، أو أن تتوضع ست ذرات في مراكز وجوه المكعب بالاضافة طبعا للذرات المتمركزة فيرؤوسه ويسمى عندها المكعب المتمركز وجهيا (شكل ١ ــ ٤ ــ b)، وأهم المعادن التي تتبلور بهذا الشكل هي : الحديد، الالمنيوم ، النحاس ، الذهب ، النيكل ، الرصاص ، التيتانيوم ، التنغستين وغيرها .



شكل (١ ــ ٤)

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

٣ـ ـ الموشور السداسي المنتظم : وله شكل واحد حيث تتوضع الـذرات على الرؤوس الستة لكلٍ من القاعدتين وإضافةلذلكتتوضع ذرة واحدة فيمنتصف كلٍ من القاعدتين وثلاث ذرات في المستوي المنصف لارتفاع الهرم بحيث تشكل مثلثاً متساوي الاضلاع طول ضلعه يساوي طول حرف قاعدة الموشور (شـكل ١ ـ ٤ c) ، وأهم المعادن التي تتشكل بلوراتها على هذا النحو : التوتيـاء والمغنزيوم والكادميوم وغيرها . إن الطريقة الصحيحة لرسم الهيكل الشبكـي هي الطريقة المبينة على يسار الشكل (١ ـ ٤) ـ أي رسم الذرات في الهيكل الشبكي على شكل كرات متلامسة ـ ولكن هذا الرسم للهيـكل الشبكي غـير مريح ، لذا تستخدم في رسم الهيكل الشبكي الطريقة الشرطية وهي المبينة علـى اليمين في الشكل (١ ـ ٤) .

يتحدد الهيكل الشبكي بعناصر هذا الهيكل أو ابعاده ، إذ يتحـدد المكعب بعنصر وحيد هو طول ضلع المكعب a (انظر الشكل ١ ـ ٤) . وتكون قيم هذا الضلع من درجة أبعاد الذرات وتقاس بالأنغستروم . فمثلاً طول ضلع الهيكل الشبكي لمعدن الكروم والذي هو مكعب متمركز حجمياً يساوي 2,878 A° ، وطول ضلع الهيكل الشبكي للالمنيوم والذي هو مكعب متمركز وجهيا يساوي 4,041 A° وفي الشكل الرباعي فان الارتفاع c لايساوي طول ضلع القاعدة a كماذكرنا سابقاً وتختلف النسبة (c/a) من معدن لآخر . أما في الموشور السداسي المنتظم فاما أن تمس الذرات بعضها بعضا (أي أن الذرات الثلاث التي تقع في داخـل الموشور تمس الذرات التي تتوضع في القاعدتين) وعندها يسمى هذا الهيكل الموشور السداسي المنتظم الكثيف بالذرات وتكون النسبة (c/a) مساوية 1,633 (انظر الشكل ١ ـ ٤) . أما إذا كانت النسبة (c/a) أكبر من ذلك فان الموشور غير كثيف بالذرات .

إضافة إلى الشكل الهندسي للهياكل الشبكية وأطوال اضلاعها والنسبة بين هذه الاضلاع فان هناك عددا من العوامل لابد من أخذها بعين الاعتبار لما لهـا من الاهمية على الخواص الفيزيائية والميكانيكية لهذه الهياكل وبالتـالي للبلورات المعدنية وأهم هذه العوامل :

آ ــ رقم الإحداثيات .

ب ــ عدد ذرات الهيكل الشبكي الواحد .

حـ ــ نسبة ملء الفراغ .

د ــ مقاييس أكبر فراغ في الهيكل الشبكي .

هـ ــ المستوي والاتجاه الاكثر كثافة بالذرات .

آ ــ رقم الإحداثيات : هو الرقم الذي نحصل عليه فيما لو اخترنا إحـدى ذرات الهيكل الشبكي وأحصينا عدد الذرات المجاورة لها مباشرة وبما أن الذرات المتجاورة هي أيضاً متلامسة فيما بينها فانه يمكن تعريف رقم الاحداثيات بأنـه 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 مـن ذرات الهيكل الشبكي أو البلورة الواحدة . وهكذا فان رقم الاحداثيـات مثلاً لذرة من ذرات المكعب البسيط هو 6 وللمكعب المتمركز حجميا 8 وللمكعب المتمركز وجهيا 12 وللموشور السداسي المنتظم كثيف الذرات 12 وللموشور السداسي المنتظم غير الكثيف هو ١٢ (أي عندما : $c/a \neq 1{,}633$) .

ب ــ 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 لاكثر من هيكل شبكي واحـد أي

مشتركة بين عدة هياكل شبكية متجاورة وذلك حسب مكان وقوعها في الهيكل الشبكي لذا فاننا 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 هيكلين شبكيين 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 مكعبا ولستة هياكل إذا كان الهيكل موشورا سداسيا • فلو حسبنا على سبيل المثال عدد الذرات التابعة لهيكل شبكي واحد من النوع المكعب المتمركز وجهياً نرى أن في هذا الهيكل ثماني ذرات متمركزة في رؤوس القاعدتين 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 هيكلين 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 :

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

جـ ــ 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 مقاييس الهيكل الشبكي وقطر الذرة d أو نصف قطرها r وبالاستعانة بالشكل الهندسي للهيكل الشبكي. ولنحسب على سبيل المثال نسبة ملء الفراغ في المكعب المتركز حجميا ، 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)، فاذا افترضنا أن طول ضلع المكعب مقدار معلوم a نستطيع أن نحسب قطر الذرة أو نصف قطرها .

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

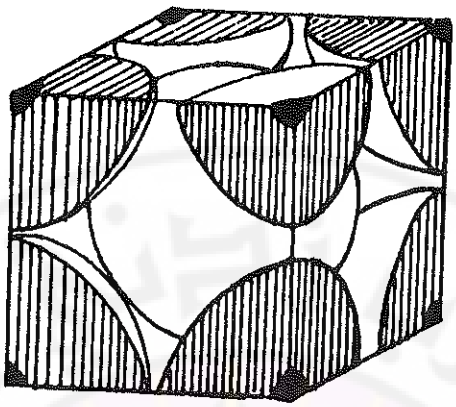
وحجم الذرات التابعة للهيكل الشبكي :

$$V_a = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} a\right)^3 \frac{\pi}{6} + 8 \cdot \frac{1}{8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} a\right)^3 \frac{\pi}{6} =$$

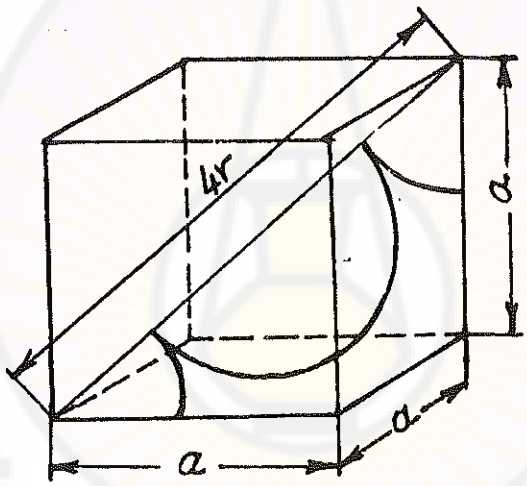
$$= \frac{\sqrt{3}\ \pi}{8} a^3 = 0{,}68\ a^3$$

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 ــ 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 ــ 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 لايؤدي بالضرورة الى نقص في مقاييس الفراغات الموجودة في الهيكل الشبكي التي قد تنقص أو قد تزيد وذلك تبعا لعدد هذه الفراغات وكيفية توزعها . ونذكر على سبيل المثال أن أكبر فراغ في الهيكل الشبكي للمكعب المتمركز حجميا يقع مركزه عند النقطة ذات الاحداثيات : $\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{4}$ ، 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 وجهياً والواقع مركزه عند النقطة $\frac{1}{2}$ ، 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 حجمياً .

هـ ــ **المستوي والاتجاه الاكثر كثافة بالذرات :** نحصل على المستوي أو الاتجاه الاكثر كثافة بمقارنة المستويات المختلفة للهيكل الشبكي والاتجاهات المختلفة فيه وذلك بعد ان تتبع مع كلٍ من هذه المستويات والاتجاهات طريقة مماثلة لتلك التي اتبعناها من أجل حساب نسبة ملء الفراغ فيكون المستوي الاكثر كثافة هو المستوي الذي تحتل فيه الذرات أكبر نسبة من المساحة ، أما الاتجاه الاكثر كثافة فهو الاتجاه الذي تمس الذرات بعضها بعضا بموجبه . ولكي نستطيع تمييز مستو

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

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

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

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

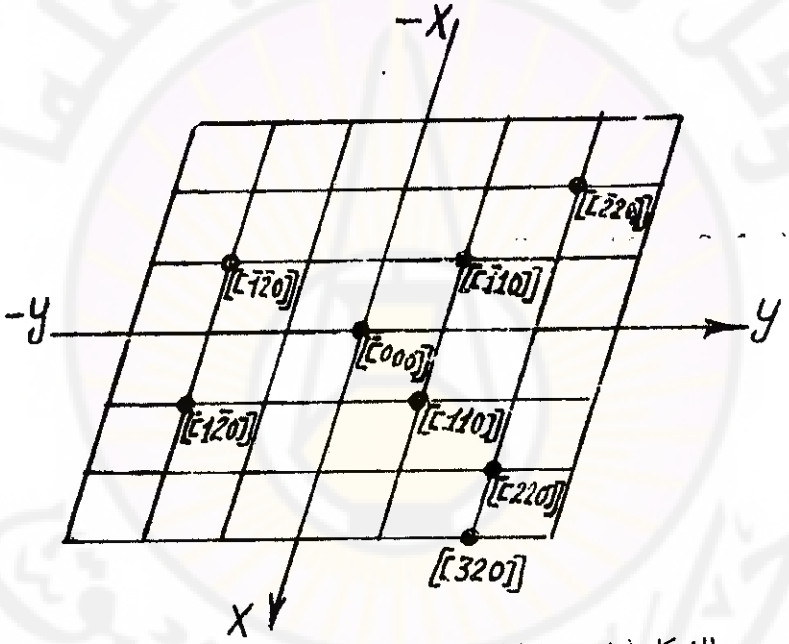
فان الطريقة التي سوف نتبعها لتحديد عنصر ما في الهيكل الشبكي (عقدة ، حرف ، اتجاه ، مستو) لاتتعلق بتعامد مجموعة المحاور الاحداثية أو عدم تعامدها وبتساوي أطوال أضلاع الهيكل الشبكي أو عدم تساويها .

١ـ اشارات العقد : ونقصد بالعقد نقاط توضع الذرات في الهياكل الشبكية فإذا عددنا إحدى عقد الهيكل الشبكي مركزاً للاحداثيات فان أي عقدة أخرى تحدد بالعلاقة التالية :

$$R = ma + nb + pc$$

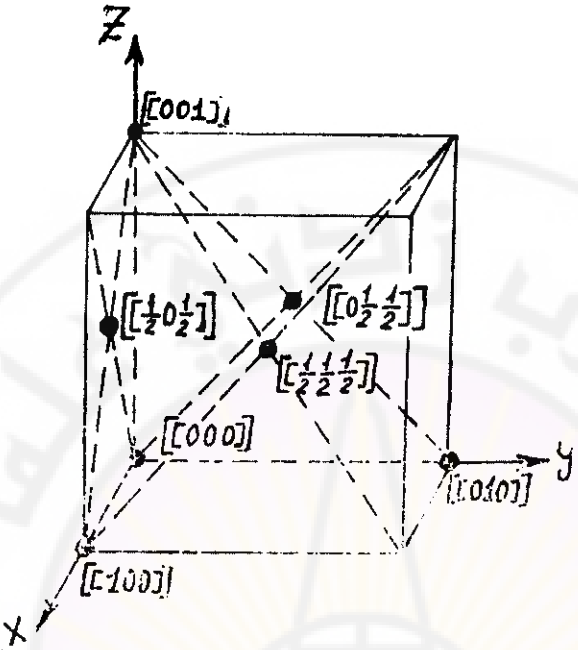
حيث : p, n, m ثلاثة أرقام . وتدعى هذه الأرقام باشارات العقدة . وتوضع هذه الارقام الثلاثة ضمن قوسين مربعين مزدوجين على الشكل التالي : [[mnp]] .

وتكتب هذه الارقام دون أي اشارات فاصلة بينها وتُقرأ بالتتالي من اليسار إلى اليمين • وعندما يكون أحـد هذه الارقام سالباً يوضع فوقه خط افقي • فمثلاً $[\bar{1}23]$ تُقرأ على الشكل التالي وهو : (صفر ، ناقص اثنان ، ثلاثة)• يُبين الشكل (١ — ٦) إشارات بعض العقد في شبكة مستوية مائلة الزوايا (حيث الاشارات على المحور z تساوي الصفر) • كما يُبيِّن الشكل (١ — ٧) إشارات العقد (الرؤوس) ومراكز الوجوه والمركز لهيكل شبكي إذا



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

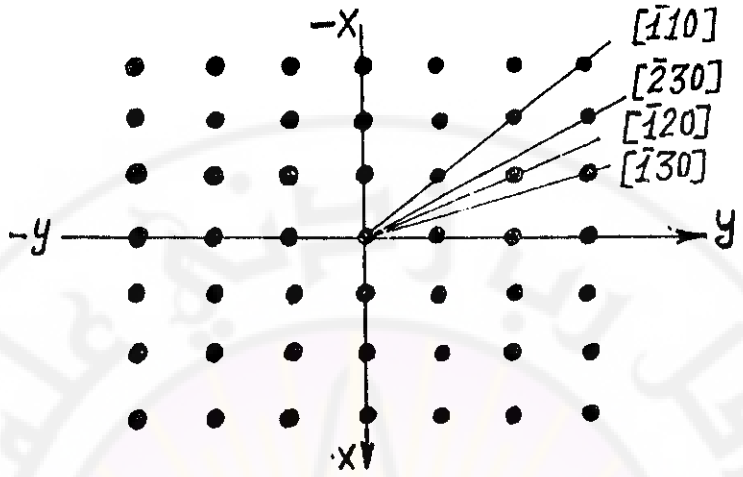
عددنا أحد رؤوسه مركزاً للاحداثيات • ويجب أن ننوه هنـا إلى أن الارقـام الكسرية تجد مكاناً فقط في إشارات العقد • وأمـا في إشـارات الاتجاهات والمستويات فتستخدم الارقام الصحيحة فقط •



الشكل (١ ــ ٧) : إشارات بعض العقد في مكعب متمركز حجمياً

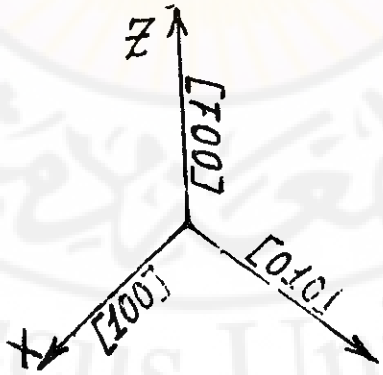
٢ـ اشارات الصفوف (الحروف) : إن الصف أو المستقيم المار بعقدة أو مجموعة عقد وكذلك الحرف في أي هيكل شبكي تحدد جميعها بزوايا ميلها بالنسبة لمحاور الاحداثيات . فاذا كان الصف لايمر من نقطة تقاطع محاور الاحداثيات فانه يمكننا أن نتصور انه يتحرك موازيا لنفسه حتى يمر من نقطة التقاطع هذه. ولهذا التصور مايبرره ذلك لأن جميع الاتجاهات المتوازية في الهيكل الشبكي متماثلة . عند ذلك يُحدد اتجاه الصف بنقطتين : نقطة تقاطع محاور الاحداثيات وأي من عقد الصف الذي نختاره . وتعد في هذه الحالة اشارة العقدة (الرأس) هي اشارة الصف نفسها وتكتب داخل قوسين مربعين [m n p] . وكما نلاحظ فان هذه الاشارة تميز مجموعة صفوف متوازية او مجموعة حروف متوازية ايضا في الهيكل الشبكي .

يُبيِّن الشكل (١ ــ ٨) بعض الصفوف في شبكة مستوية (z = 0) . وكما



الشكل (١ ــ 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 مايؤخذ عادة أقرب عقدة الى نقطة تقاطع محاور الاحداثيات • تكون اشارات محاور الاحداثيات في هذه الحالة على الشكل التالي : 0 x -- [100] ، 0 y – [010] ، 0 z – [001] وهذا واضح في الشكل (١ ــ ٩) • وهنا



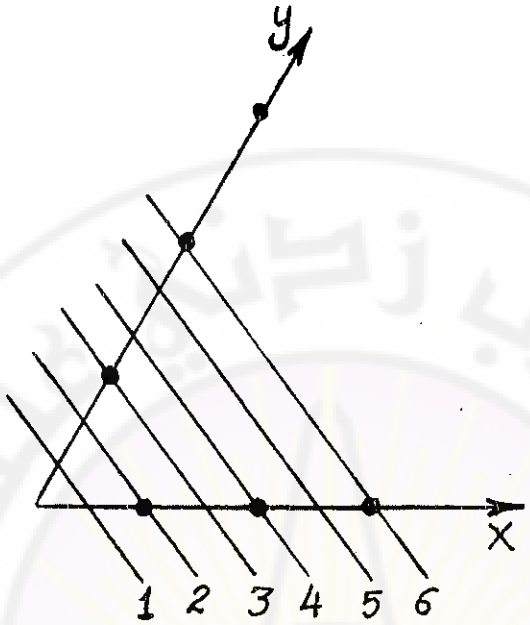
الشكل (١ ــ ٩) : اشارات محاور الاحداثيات

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

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

يبين الشكل (١ ــ ١٠) مجموعة مستويات متوازية فيما بينها وتوازي المحور z وتبعد هذه المستويات عن بعضها بعضا بمسافات متساوية • يمكننا أن نكتب إحداثيات كل مستوٍ من هذه المستويات واشاراته 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 : ∞ = 3 : 2 : ∞
2	a	2 b/3	∞	1 : 2/3 : ∞ = 3 : 2 : ∞
3	3 a/2	b	∞	3/2 : 1 : ∞ = 3 : 2 : ∞
4	2 a	4 b/3	∞	2 : 4/3 : ∞ = 3 : 2 : ∞



الشكل (١ ــ ١٠) : مجموعة مستويات متوازية فيما بينها وتوازي المحور z

يمكن عد سلسلة نسب الارقام $m:n:p$ لكل المستويات المتوازية هي نسب لأرقام صحيحة $p:q:r$ ، وتسمى هذه الاخيرة عوامل بَيْس • ويمكننا من الجدول السابق كتابة النسب على الشكل التالي :

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

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

ولكن لتمييز مستوٍ ما أو اتجاه في هيكل شبكي لاتستخدم هذه العوامل وإنما يُستخدم مايسمى اشارات ميللر • وإشارات ميللر هي مقلوب عوامل بَيْس وبعد تحويلها الى أرقام صحيحة • لذا تكون إشارات ميللر :

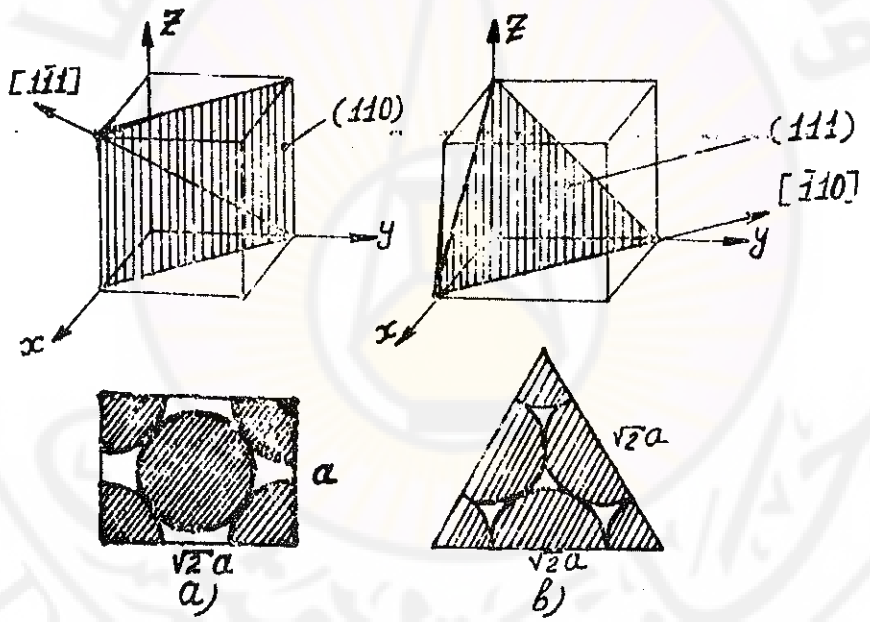
$$\frac{1}{p}:\frac{1}{q}:\frac{1}{r} = h:k:l$$

فمثلاً تكون إشارات ميللر للمستويات المبينة في المثال السابق (شكل ١ ــ ١٠).

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

لهذا تسمى الارقام l و k و h إشارات ميللر وتوضع في أقواس دائرية بدون أي إشارات فاصلة بينها وتقرأ بالتتالي من اليسار الى اليمين • وعندما يكون أحد هذه الارقام سالباً يوضع فوق هذا الرقم خط أفقي قصير •

ويبين الشكل (١ ــ ١١) إشارات ميللر للمستويات والاتجاهات الاكثر كثافة بالذرات في المكعب المتمركز حجميا والمكعب المتمركز وجهيا •



الشكل (١ ــ ١١) : المستويات والاتجاهات الاكثر كثافة بالذرات في كل من المكعب المتمركز حجميا والمتمركز وجهيا .

أما في الموشور السداسي فان الامر يختلف عنه في المكعبات والسبب في ذلك

يعود إلى أنه عند استخدام الاحداثيات الثلاثية فان :

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

وهذا واضح على الشكل(١ ــ ١٢ a) الذي يبين مرتسمات وجوه الموشور والتي تكون موازيــة للمحور z (حيث المحور z عمودي علــى مستوي الرسم) • فعند استخدام الاحداثيات الثلاثية نلاحظ أن الوجوه المتماثلة لهــذا الموشور تشغل مواقع مختلفة بالنسبة لمحاور الاحداثيات الافقية إذ تكون الوجوه AF ، BC ، CD ، EF موازية لأحد المحورين وتتقاطع مع المحور الآخر بينما يتقاطع الوجهان AB و DE مع كلا المحورين • وبما أن نقاط تقاطع هذه الوجوه مع المحاور الافقيــة X , Y تبعد مسافات متساوية عن المركز وتساوي كل مسافة a فان إشارات ميللر 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 DE , AB فهي :

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

أو ($1\bar{1}0$) للوجه ($\bar{1}10$ ، AB) الوجه DE .

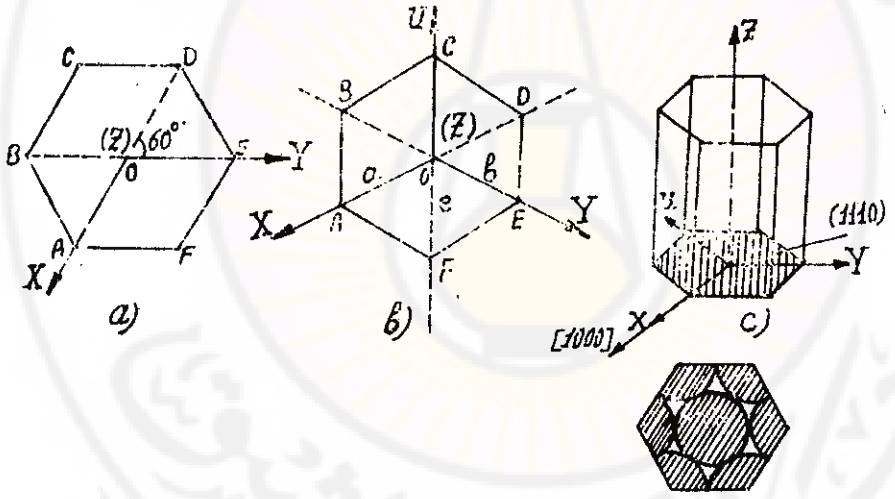
من هنا نلاحظ أن الوجــوه المتماثلة للشكل نفسه (الموشــور) تكتب بإشارات مختلفة ، وللتخلص من هذا الإشكال يمكن استخدام محور إحداثيات رابع وليكن u والذي يشكل زوايا متساوية (وتساوي 120°) مع كل مــن المحورين X ، Y ويكون هذا المحور عموديا على المحور z • لهذا ولكتابــة إشارات ميللر لهذه الوجوه في مجموعة المحاور الاحداثية الرباعية تستخدم أربعة عناصر هي : a ، b ، e ، c حيث :

$$a = b = e \neq c$$

وتضاف في هذه الحالة إلى إشارات المستوي أو الاتجاه الاشارة الرابعة المناسبة i المعينة من العلاقة :

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

وهكذا فان كلاً من الوجوه المتماثلة آنفة الذكر في الموشور السداسي تتقاطع مع محاور الاحداثيات الرباعية في خطين يختلفان فيما بينهما بالتسمية والاشارة (انظر الشكل ١ ــ ١٢ b)، فمثلا يكون الوجه Ab موازيا للمحور u



الشكل (١ ــ ١٢) : اشارات ميللر لوجوه مختلفة في الموشور السداسي المنتظم .

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

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

أو $(1\bar{1}00)$.

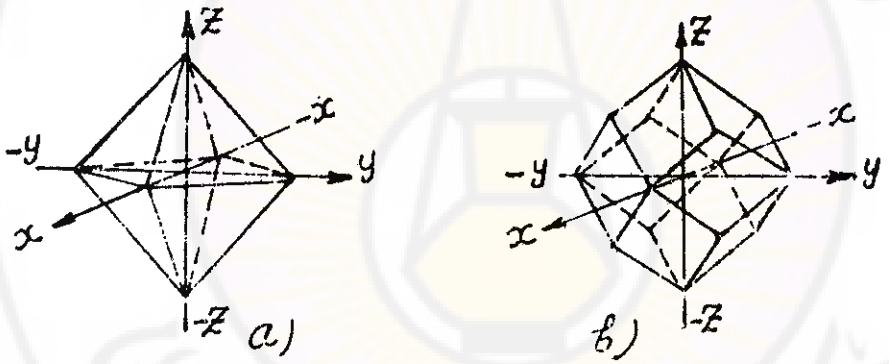
أما إشارات الوجوه الاخرى فهي :

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

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

وتكون إشارات ميللر في هذه الحالة للمستوي والاتجاه الاكثر كثافة بالذرات هي التي يبينها الشكل (١ ــ ١٢ c) .

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 ــ ١٣) : مستويات متماثلة في الهيكل الشبكي.

المستويات بأن تؤخذ اشارات أحدها فقط وتوضع ضمن قوسين مركبتين. فمثلا الاشارة { 111 } تعني كل المستويات المبينة في الشكل (١ ــ ١٣ a) وهي :

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

وتعني الاشارة { 110 } كل المستويات المبينة في الشكل (١ ــ ١٣ b) وهي :

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

$(10\bar{1})$ ، $(01\bar{1})$ ، $(0\bar{1}1)$.

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

$[121]$ ، $[112]$ ، $[\bar{2}11]$ ، $[2\bar{1}1]$ ، $[\bar{1}21]$ .... الخ .

* * *

الفصل الثاني

البنيـــة الحقيقية للبلورات المعدنية وعيوب الهياكل البلورية

٢ ـ ١ . البنية الحقيقية للبلورات المعدنية :

لقد تعرفنا في الفصل السابق على البنية المثالية للبلورات المعدنيـــة وافترضنا أنه في الحالة المثالية تكون الذرات متوضعة في عقدها المخصصة لها في الهيكـــل الشبكي بشكل منتظم وصحيح بينما تشكل مجموعة الهياكل الشبكيـــة هـــذه ما يسمى البلورة المعدنية المثالية . وبناءً على معرفـــة التركيب الذري والبنيـــة البلورية للمعادن أمكن تفسير الكثير من خواص هذه المعادن الفيزيائية والميكانيكية. غير أن هناك العديد من هذه الخواص لم تكن قابلة للتفسير إلا بعـــد أن افترض أن هناك أخطاء أو عيوباً في تركيب الهياكل الشبكية للبلورات وعـــدم انتظام في توزع الذرات على تلك الهياكل .

وقد قسمت خواص المعادن من هذه الناحية الى مجموعتين : المجموعـــة الأولى ـــ وتشمل الخواص التي لا تتأثر بالبنية وبالعيوب الناجمة عن عدم انتظام الهياكل الشبكية ، ومن هذه الخواص : الناقلية للحرارة والكهرباء ، **الحـــرارة** النوعية ، عامل التمدد الحراري ، عامل المرونة ... الخ والمجموعـــة الثانيـــة ـــ وتشمل الخواص التي تتأثر تأثراً كبيراً بعيوب الهياكل الشبكية ، وكل الخواص الميكانيكية تقع تقريباً ضمن هذه المجموعة .

ولتفسير ما يسمى 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 فان 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 سنتعرض لها فيما بعد (الفصل الرابع من هذا الكتاب) .

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

ويجب أن ننوه هنا الى أن الحصول على قطعة معدنية مؤلفة من بلورة أحادية (مونوكريستال) يتم عندما يكون تبريد هذه القطعة بطيئاً جداً ؛ هذا بالاضافة الى 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 عليها .

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 ـ ٢ ـ عيوب الأبياكل الشبكية :

تصنف عيوب الهياكل الشبكية حسب طبيعة انتشارها في ثلاثة أنواع :

١ً ـ عيوب نقطية الشكل .

٢ً ـ عيوب خطية الشكل .

٣ً ـ عيوب سطحية الشكل .

إن هذه العيوب غالباً ماتكون ذات أبعاد ثلاثة وتمتد لتحتل حجوماً معينة، ولكن يبقى لهذا التصنيف مايبرره ، 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 ـ ٢ ـ ١ ـ العيوب النقطية :

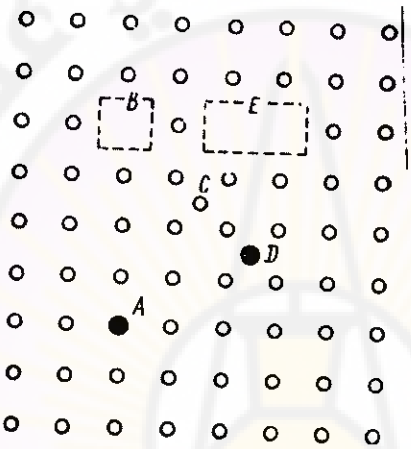
العيب النقطي هو خرق في البنية البلورية . وتكون أبعاد هذا العيب ، ووفق جميع الاتجاهات في الفراغ ، من مرتبة مسافة واحدة أو عدد محدد من المسافات بين الذرات . ويمكن أن يكون للعيب النقطي شكل بسيط أو معقد وذلك حسب ظروف تشكله ، وسوف نبحث في الأشكال البسيطة للعيوب النقطية فقط وهي :

آ ـ الثقوب : وتعني وجود أمكنة فارغة في عقد الهيكل الشبكي لم تحتلها الذرات .

ب ـ الذرات التداخلية : وهي ذرات متوضعة في أماكن غير نظامية بين عقد الهيكل الشبكي . ويمكن أن تكون هذه الذرات أساسية (أي من العنصر الأساسي نفسه) أو أن تكون غريبة .

جـ ــ الذرات التبادلية : وهي ذرات غريبة تحل محل ذرات العنصر الأساسي في عقد الهيكل الشبكي والتي غالباً ما تكون مختلفة في حجومها عن ذرات هـذا العنصر •

ويبين الشكل (٢ ــ ١) النماذج الأساسية للعيوب النقطيـة في الهياكـل الشبكية •



A – ذرة تبادلية .
B – ثقب .
C – ذرة تداخلية أساسية .
D – ذرة تداخلية غريبـة .
E – ثقب مزدوج .

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

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

تكون الطاقة اللازمة لتشكل ثقب واحد هي من مرتبة الالكترون 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 ½ الكترون فولط ، وهذا يعني أن الطاقة اللازمة لتشكل ثقب واحد في بلورة الجرمانيوم تساوي ٢ الكتروناً فولطاً ، بينما تساوي الطاقة اللازمة لتشكل ثقب في بلورة السيليسيوم ٣ر٢ الكتروناً فولطاً ... وهكذا .

يمكن أن تتحد الثقوب مع بعضها لتشكل 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 منحنياً أو أن تتحد على شكل صفيحة ذرية . وكل هذه العيوب تكون أقل استقراراً من العيب النقطي الأحادي ذلك لأنه يلزم لتشكلها طاقة أكبر بكثير من الطاقة اللازمة لتشكل العيب النقطي . فمثلاً يلزم لتشكل العيوب المختلفة في بلورة النحاس وعند درجة حرارة الغرفة الطاقة التالية :

لتشكل ثقب أحادي ~ ٩ر٠ ÷ ١ر٠ الكتروناً فولطاً

للذرة التداخلية بين عقد الهيكل ٤ر٢ الكتروناً فولطاً

لحبل من الذرات التداخلية وفق الاتجاه < 100 > ٧ر٢ ÷ ٨ر٢ الكتروناً فولطاً

لحبل من الذرات التداخلية وفق الاتجاه < 111 > ١ر٤ الكتروناً فولطاً

وتصرف الطاقة آنفة الذكر ليس فقط على تفكيك الروابط وإنما تصرف أيضاً على تشويه الهيكل الشبكي في المكان المحيط بالعيب المتشكل وذلك بسبب إزاحة الذرات عن وضعها الاستقراري .

يمكن 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 المختزنة في المجموعة وتزداد في الوقت نفسه الانتروبيا حيث تتعلق الانتروبيا بعدد احتمالات توضع الذرات في الهياكل الشبكية ، فلو فرضنا أنه في هيكل ما أن عدد الاماكن الكلية التي يمكن للذرات أن تحتلها N والفارغة منها n فيكون عدد الاحتمالات W مساوياً :

$$W = \frac{N\,i}{(N-n)\,!\,n!} \qquad (2.1)$$

والإنتروبيا هي تابع للرقم W حسب علاقة بولتسمان :

$$S = k \cdot ln\, W \qquad (2.2)$$

يكون تركيز الثقوب (أي نسبة عدد الاماكن الفارغة الى الاماكن 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 :

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

حيث : N ـ العدد الكلي للذرات في واحدة الحجوم من البلورة •

n ـ عدد الثقوب في ذلك الحجم •

E ـ القدرة النشطة للثقب والتي تساوي العمل اللازم لتشكل هذا الثقب •

k ـ ثابت بولتسمان •

ويبين الجدول التالي كيف يزداد تركيز الثقوب بارتفاع درجة حرارة بلورة من معدن النحاس :

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

وهذا يعني أنه عندما تكون درجة حرارة بلورة النحاس ($T \approx 1100\ ^\circ K$) فان نسبة تركيز العيوب $\frac{n}{N} \sim 10^{-5}$ ، أي أنه لكل ١٠^٥ عقدة يوجد ثقب واحد وتكون المسافة الوسطية بين الثقوب الاحادية مساوية عددا من المسافات الذرية .

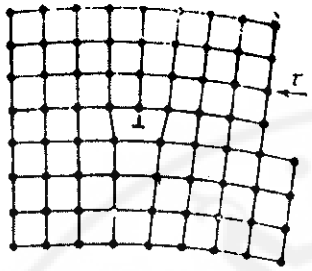
٢ ـ ٢ ـ ٢ ـ ٢ العيوب الخطية الشكل :

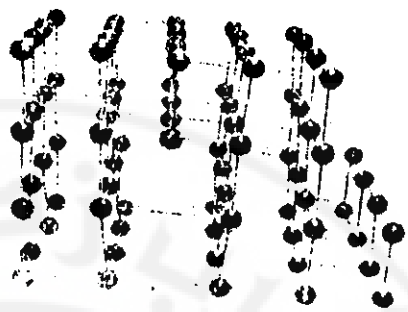
العيب الخطي ـ هو خرق في نظام البنية البلورية على طول خطٍ ليس بالضرورة أن يكون مستقيما . ولا تتعدى أبعاد المقطع العرضي لهذا العيب مسافة ذرية أو بضع مسافات ذرية أما طوله فيمكن أن يساوي طول البلورة المعدنية .

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

الانخلاعات الخطية والحازونية ـ المزايا الاساسية للانخلاعات :

يمكننا أن نتصور الانخلاع الخطي على أنه حرف لمستوٍ ذري غير كامل (انظر الشكل ٢ ـ ٢). ويبيّن الشكل (٢ ـ ٣) أن حرف المستوي المبتور داخل الهيكل الشبكي يتشكل اذا حركنا من الاعلى نصف مستو بين مستويات بلورة مثالية أو اذا قطعنا نصف مستو ذري من الاسفل . ويجب أن نلاحظ أن



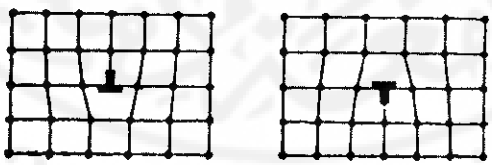


الشكل (٢ ــ ٢) : نموذج للانخلاع الخطي الشكل (٢ ــ ٣) : مخطط الانخلاع الخطي

الشكل (٢ ــ ٢) يُبيِّن فقط شبكة ذريـة واحدة ومخرج الانخلاع على هذه الشبكة ، بينما يجب أن تتصور أن للبلورة طولاً معيناً وهذا الانخلاع هو خـط يخرج من مستوي الرسم • وبشكل أبسط يمكن أن تتصور أن البلورة التـي تحتوي على انخلاع خطي كالكتاب الذي تكون إحدى أوراقه قد بُتر نصفها •

يُسمى نصف المستوي هذا المستوي الزائد أو المستوي الاضافي • وكمـا نلاحظ من الشكلين السابقين فان وجود هذا المستوي الاضافي سوف يحـدث تشوهاً في المستويات المجاورة له مباشرة وسوف يقل مقدار هذا التشوه كلمـا ابتعدنا عن المستوي المذكور •

تقسم الانخلاعات الخطية الى موجبة وسالبة • فالانخلاع الخطي الموجـب (شكل ٢ ــ ٤ a) يطابق تلك الحالة عندما يكون المسـتوي الاضـافي مـن

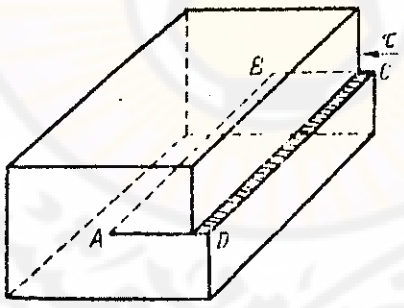


a) b)

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

الاعلى ، وطبقاً لذلك فان الاجهادات المؤثرة في النصف العلوي من البلـورة هي اجهـادات ضـغط وفي النصـف السـفلي اجهـادات شـد • أما الانخـلاع الخطي السـالب (شكل ٢ ــ ٤ ب) فيطابـق تلـك الحالـة عندما يكون النصـف العلـوي من البلورة واقعـاً تحـت تأثـير إجهـادات شـد والنصف السفلي واقعاً تحت تأثـير إجهادات ضـغط • ونلاحظ على الشكل (٢ ــ ٤) كيف يُرمز عادةً للانخلاعين السالب والموجب • وليس من الصعب هنا ملاحظـة أنه يمكن الحصول على أحد الانخلاعين من الآخر وذلك بإدارته بزاوية ١٨٠ درجة• لهذا فليس هناك من معنى للتوقف على إشارة الانخلاع إذا كان هـذا الانخلاع وحيداً في البلورة ، بينما يكون للاشارة معنى إذا تواجد انخـلاع آخر بجانبـه فالانخلاعات التي لها الاشارة نفسها تتدافع بينما تتجاذب الانخلاعات المختلفـة الاشارة •

يُبيِّن الشكل (٢ ــ ٥) بلورة تقـع تحـت تأثير إجهـاد انزلاق (قص) حيث يسبب هذا الاجهاد انفعالات لدنة مما يؤدي الى أن النصف العلوي ينزلق على مستوي الانزلاق ABCD وذلك بالنسبة للنصف السفلي • فاذا قارنا بـين

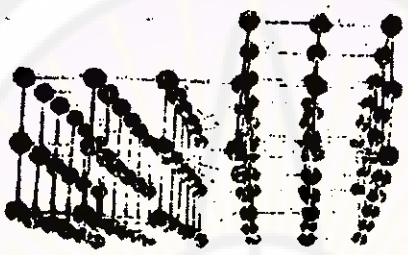


الشكل (٢ ــ ٥) : الانخلاع الخطي الناتج عن تأثير اجهاد قص على البلورة المعدنية .

الشكلين (٢ ــ ٤) و (٢ ــ ٥) فانه يمكن أن نرى أن حـد الانزلاق AB والذي يفصل بين القسم المنزلق والقسم الثابت من البلورة هو الانخلاع الخطي الذي نتحدث عنه •

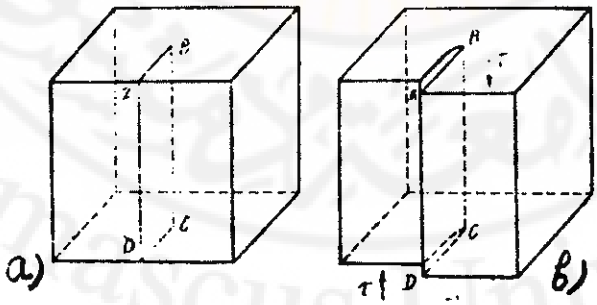
أما الانخلاع الحلزوني (انظر الشكل ٢ ــ ٦) فهو انزلاق أحد جزئي البلورة بالنسبة للآخر • ويمكننا أن نتصور الانخلاع الحلزوني على الشكل التالي :

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



الشكل (٢ ــ ٦) : نموذج للانخلاع الحلزوني .

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

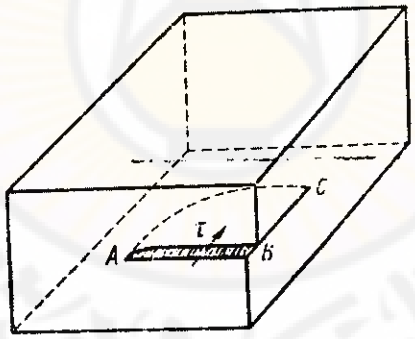


الشكل (٢ ــ ٧) : الانخلاع الحلزوني الناتج عن تأثير إجهاد قص على البلورة المعدنية

الخطي ، يكون تشوه الهيكل الشبكي متمركزا قرب خط الانخلاع في منطقة ضيقة لايتعدى قطرها بضع مسافات ذرية .

تكون الانخلاعات الحلزونية إما يمينية أو يسارية ويلعب اتجاه الدوران في هذه الحالة الدور نفسه الذي تلعبه الاشارة عند الانخلاعات الخطية فالانخلاعان الحلزونيان اليمينيان أو اليساريان يتدافعان فيما بينهما أما الانخلاعان اليميني 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 حالة الانزلاق في البلورة الحقيقية ؛ وفي أغلب الاحيان ، يكون محددا بحدود أكثر تعقيدا من تلك التي وضعناها . إذ غالبا مايكون الانخلاع مختلطا — أي خطيا وحلزونيا في الوقت نفسه — وعندها يكون خط الانخلاع هو المنحني AC كما في الشكل (٢ — ٨) .

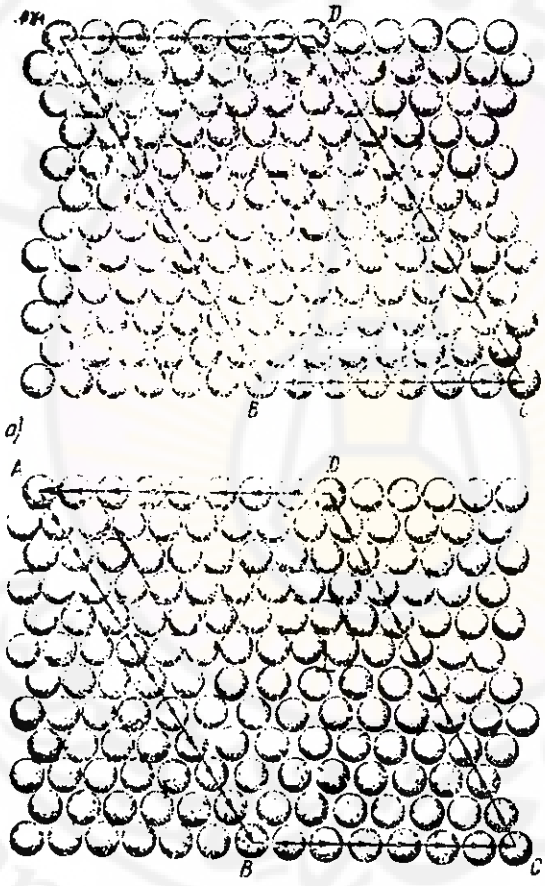


الشكل (٢ — ٨) : انخلاع مختلط (خطي وحلزوني) ناتج عن تأثير إجهاد قص على البلورة المعدنية .

تحديد نوع الانخلاع بوساطة شعاع بورغرز :

لتمييز الانخلاعات وتحديدها من حيث الحجم والاتجاه تتبع الطريقة المسماة

طريقة بورغرز ، حيث يُختار أحد المستويات الذرية وفي هذا المستوي تؤخذ إحدى الذرات ويُرسم بدءا منها مضلع مغلق بحيث تكون أضلاع هذا المضلع موازية لحروف الهياكل الشبكية وبحيث يكون عدد المسافات الذرية المأخوذة من الاعلى الى الاسفل مساويا عددها من الاسفل الى الأعلى ومن اليمين إلى اليسار مساوياً مايؤخذ من اليسار إلى اليمين ؛ فإذا كان هذا المستوي خاليا من



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

a) مضلع بورغرز في مستوي ذري مثالي .

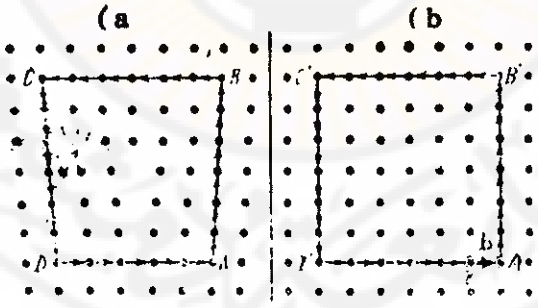
b) مضلع بورغرز في نفس المستوي الذري ولكن بعد أن احدث فيه انخلاع خطي .

الانخلاعات فان المضلع المرسوم يصبح مغلقاً أي اننا سوف نعود إلى نقطةالبدء، أما إذا احتوى المستوي على انخلاع ما فان إغلاق المضلع يحتاج الى شعاع $\vec{b}$ يُسمى شعاع بورغرز ؛ ويوضح الشكل (٢ ــ ٩) هذه الطريقة ، إذ رسمنا في المستوي الذري المبين فيالشكل (٢ــ٩ a) مضلع بورغرز المغلق ــ أي الذي لايحتوي بداخله على انخلاع ، ثم رسمنا في المستوي الذري نفسهولكن بعد أن احتوى بداخله على انخلاع خطي المضلع السابق نفسه (انظر الشكل ٢ ــ ٩ b) ، وأخذنا نقطة البدء في كلتا الحالتين النقطة A ، كما أخذنا الاضلاع مساوية بالمسافات الذرية مايلي :

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

فاننا نلاحظ أن المضلع السفلي لن يكون مغلقا ويحتاج إلى شعاع بورغرز لإغلاقه • وكما نلاحظ فان شعاع بورغرز يساوي في هذه الحالة مسافة ذرية واحدة •

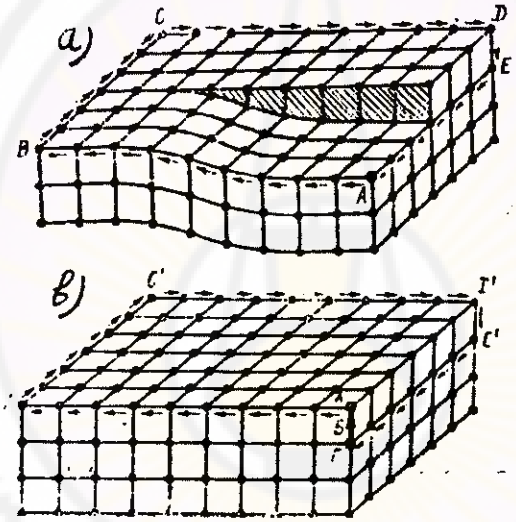
ونستطيع من هذا التوضيح أن نعطي تعريفا لشعاع بورغرز على أنه : مقياس للانحرافات التي تحدث في جزء من البلورة بسبب وجود الانخلاعات في هذا الجزء •



الشكل (٢ ــ 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 مستو ذري يحتوي على انخلاع ، وعندها فان المضلع المفتوح والذي يحتاج إلى شعاع بورغرز لاغلاقه سوف يكون في المستوي الذري المثالي ــ أي المستوي الذي لايحتوى على انخلاع ــ انظر الشكل (٢ ــ ١٠ b) .

يبين الشكل (٢ ــ ١١ a) مضلع بورغرز في المستوي الذري الذي يحتوي على انخلاع حلزوني . ونلاحظ هنا أن شعاع بورغرز يساوي خطوة اللولب ويتجه باتجاه محور الانخلاع ، أما في حالة الانخلاع الخطي فان شعاع



الشكل (٢ ــ ١١) : مضلع بورغرز للانخلاع الحلزوني .
a) مضلع بورغرز المغلق في مستوي ذري يحتوى على انخلاع .
b) مضلع بورغرز المفتوح في مستوي ذري مثالي .

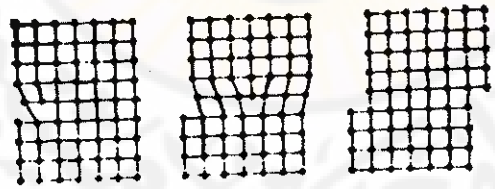
بورغرز يساوي مسافة ذرية واحدة (أي المسافة بين مستويين ذريين) ويتجه باتجاه الانزلاق .

يسمح لنا شعاع بورغرز بتفسير الفرق بين الانخلاعات وبعض العيوب الخطية الاخرى مثل سلاسل الثقوب او سلاسل الذرات الدخيلة . فمضلع بورغرز

المرسوم في مستوٍ ذري يحتوي على سلسلة خطية من عيوب نقطية لايختلف عن مضلع بورغرز المرسوم في المستوي الذري نفسه ولكن دون أن تحوي هذه السلسلة من العيوب النقطية ، وسوف يكون شعاع بورغرز في هذه الحالة مساويا الصفر • أما في الانخلاعات فان شعاع بورغرز لايساوي الصفر •

تحرك الانخلاعـات :

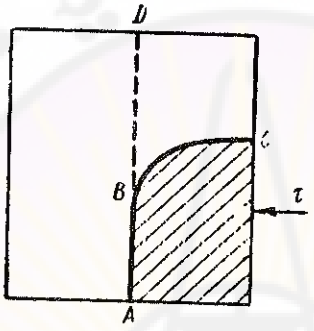
إن الميزة الأساسية للانخلاعات هي حركتها عبر البلورة المعدنية فيما إذا تعرضت هذه الانخلاعات لتأثير قوى خارجية • ولنفرض أن انزلاقاً ماحدث في البلورة المعدنية وأن حدود حقل الانزلاق انخلاع خطي (انظر الشكل ٢ ــ ١٢ a) • فحتى يتحرك هذا الانخلاع على مستوي انزلاقه ولمسافة ذرية واحـدة لايلـزم فك الارتباط في جميع المستويات الذرية التي تتقاطع مع مستوي الانزلاق وإنمـا يكفي فكّ الارتباط وفق المستوي الذّري المجاور وعندها سوف يتحرك الانخلاع نحو اليمين ولمسافـة ذرية واحـدة (انظر الشـكل ٢ ــ ١٢ b) • وبهـذا الشكل ينتقل المستوي الاضافي بكامله مع حافته التي تشكل الانخلاع الخطي إلى اليمين مسافـة ذرية واحدة • واذا استمر تحرك الانخلاع وانزلاقه حتى نهاية البلورة فانه يفنى إلا أنه يترك في البلورة انزلاقا مساويا شعاع بورغرز (انظـر الشكل ٢ ــ ١٢ c) •



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

إن الانخلاع يمتد عادة في البلورة من السطح إلى السطح أو يتجزأ الـى انخلاعات أخرى أو يشكل داخل البلورة خطاً مغلقاً ولكن لايمكن أن ينتهي انخلاع

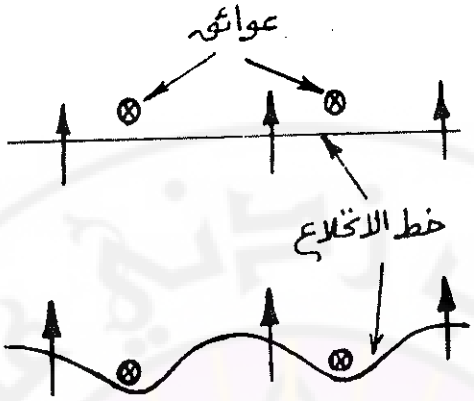
ما داخل البلورة • وخط الانخلاع ليس بالضرورة خطا مستقيما بل يمكن أن يأخذ أي شكل كما نلاحظ من الشكل (٢ ــ ١٣) • فعلى هذا الشكل يمكن أن نفرض أن الخط ABC هو حد لحقل الانزلاق ــ أي ه وانخلاع خطي ــ فمن الواضح أن الانزلاق لا يمكن أن ينتهي داخل البلورة فإما أن يستمر خط الانخلاع على طول البلورة كاملاً (أي حتى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



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

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

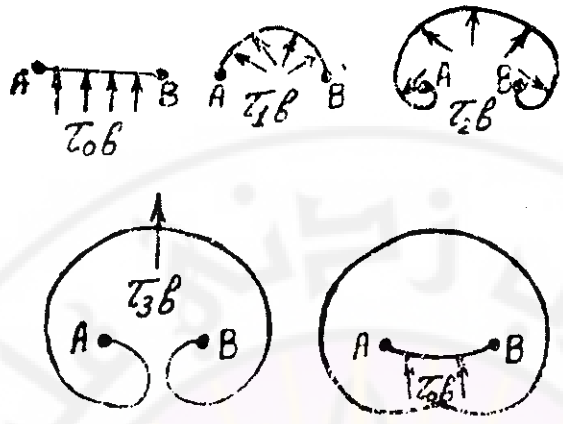
رأينا فيما سبق أنه نتيجة لتأثير قوى القص تنتقل الانخلاعات على امتداد مستويات انزلاقها • وفي هذه الاثناء تمر عبر أخطاء وتشوهات أخرى في الهياكل البلورية الشبكية وهذه التشوهات قد تشكل عوائق تعيق حركة الانخلاعات وتفوقها من سرعة غير أن تأثير هذه العوائق لا يكون عادة في طول خط الانخلاع بل غالبا ما يقتصر على اعاقة بعض نقاط هذا الخط واذا كانت القوة المطبقة أو بالاحرى الاجهاد كبيراً فان خط الانخلاع ينحني من بين هذه العوائق ويتابع سيره كما في الشكل (٢ ــ ١٤) • ولهذه الظاهرة أثرها الكبير في قابلية المعادن للتشكيل اللدن حيث



الشكل (٢ ــ ١٤) : تأثير العوائق على حركة الانخلاعات .

أنه عندما يبدأ الانسياب في المعدن فان الانخلاعات الموجودة في البنية تبدأ بالتحرك وعندما تصادف مايعيقها وينحني خط الانخلاع بين نقاط الاعاقة فان الانخلاع يتابع تقدمه بالاتجاه العمودي على خط الانخلاع كما في الشكل (٢ ــ ١٥) أي أنه في النهاية سوف يتشكل من كل خطٍ واصل بين نقطتي إعاقة خط انخلاع مغلق وخط مستقيم جديد ولايلبث بتأثير الاجهاد ان يكرر هذه العملية باستمرار ليكون بمثابة منبع لتوليد الانخلاعات وتسمى هذه الظاهرة منبع فرانك ريد .

ولهذا فان عددالانخلاعات في البنية يزداد بتأثير التشكيل اللدن للمعدن . وفعلاً ثبت من الناحية العملية أنه عند تشكيل المعادن على البارد تزداد قساوتها، وأول مايتبادر الى الذهن عندئذ أن هذه القساوة قد تكون ناجمة عن فناء بعض الانخلاعات في البنية ، غير ان دراسات البنية أثبتت عكس ذلك حيث تبين أن كثافة الانخلاعات في البنية المشكلة على البارد ترتفع لتبلغ ١٠١١ ــ ١٠ ١٢سم/سم٣، بينما تبلغ كثافة الانخلاعات في المعادن المطراة أو المسكوبة نحو ٨١٠سم/سم٣ .

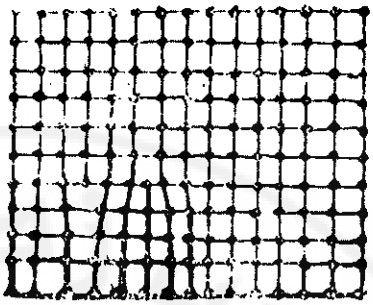


الشكل (٢ ــ ١٥) : منع فرانك وريد .

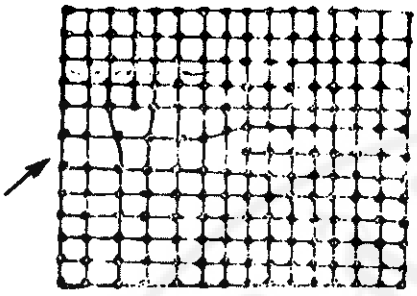
تاثير الانخلاعات في بعضها بعضا :

إن تحرك انخلاع ما في مستوي الانزلاق بتأثير قوى القص سوف يؤثر في الانخلاعات الاخرى الموجودة في البلورة بل أنه سيفسح المجال أمام الانخلاعات للتأثير في بعضها بعضا حيث أنه يتشكل جو من الاجهاد المرن حـول الانخـلاع المتحرك فان ذلك سيساعد على توليد قوى جذب بين الانخلاعات المتوازية والمختلفة في الاشارة وقـوى دفع بين الانخلاعات المتوازية والمتفقة في الاشارة وهكذا فان الانخلاعات المتوازية المختلفة في الاشارة والتي تشترك في مستو انزلاق واحد يمكن أن تفني بعضها بعضاً إذ أنه من مستويين إضافيين أحدهما تحت مستوي الانزلاق والآخر فوق مستوي الانزلاق (انظر الشـكل ٢ ــ ١٦) يمكن أن يتشكل مستو طبيعي واحد . أما الانخلاعات المتفقـة في الاشارة فانهـا تستمر في دفعها لبعضها بعضاً في مستوي الانزلاق حتى نهاية البلورة .

إن الانخلاعات موجودة في البلورة بالاتجاهات كافـة وليست بالضرورة متوازية أو شاقولية المستويات الاضافية كما أن القوى المؤثرة ليست دائما عمودية



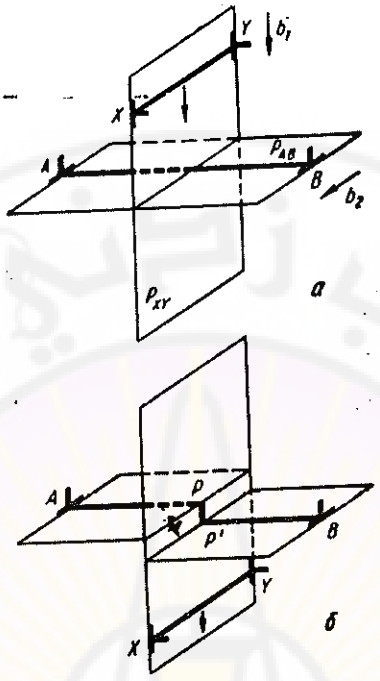
الشكل (٢ ــ ١٦) : انخلاعات خطيان مختلفا الاشارة ولهما مستوي إنزلاق واحد.



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

على خط الانخلاع بل يمكن أن تكون مائلة بحيث ان مركبتي القوة يمكن أن تؤثرا في الانخلاعات المتعامدة مع بعضها بعضا (شكل ٢ ــ ١٧) وتحركهما 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 ــ ١٨) يبين تقاطع انخلاعين خطيين حيث شعاعا بورغرز لهذين الانخلاعين متعامدان ، أما الشكل (٢ ــ ١٩) فيبين تقاطع انخلاعين خطيين أيضا ولكن شعاعي بورغرز لهذين الانخلاعين متوازيان • نلاحظ أن هناك إختلافاً واضحاً بين العتبة pp' في الشكل (٢ ــ ١٨) والعتبتين PP' و QQ' في الشكل (٢ ــ 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 فان العتبة pp' قد لاتتحرك 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



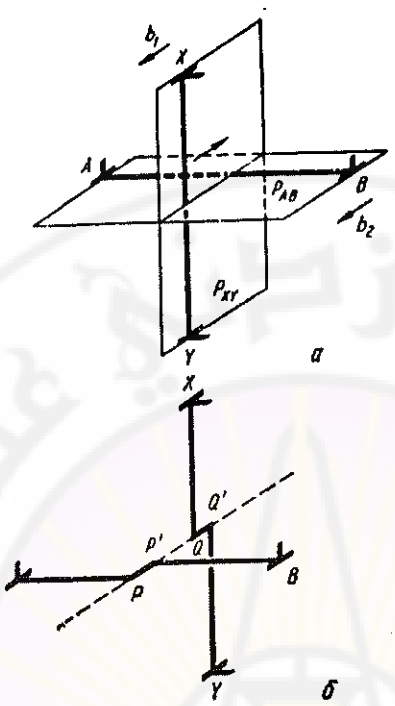
الشكل (٢ ــ ١٨) : تقاطع انخلاعين خطيين بحيث يكون شعاعا بورغرز ليهما متعامدين

a) ــ شكل الانخلاعين قبل التقاطع .

b) ــ شكل الانخلاعين بعد التقاطع .

PP′ ــ 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 ــ ١٩) فانهما تقعان في مستويات انزلاق الانخلاعات التي تشكلت منها هذه العتبات وعندما تتحرك هذه الانخلاعات فان العتبات المتشكلة سوف تزول وبالتالي لن تشكل أي عتبة أمام تحرك هذه الانخلاعات .



الشكل (٢ ـ ١٩) : تقاطع انخلاعين خطيين بحيث يكون شعاعا بورغرز لهما متوازيين

a) ـ شكل الانخلاعين قبل التقاطع .

b) ـ شكل الانخلاعين بعد التقاطع .

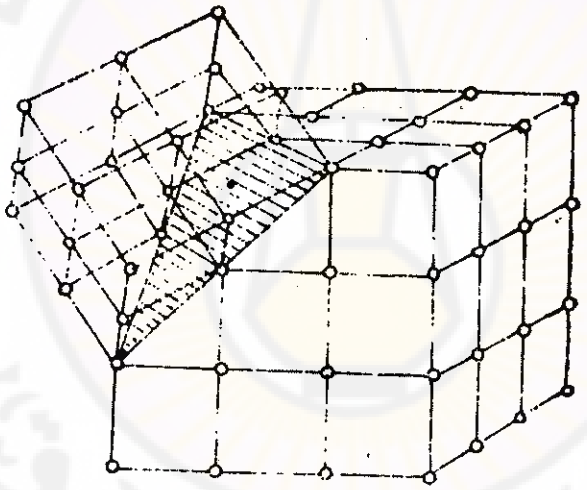
PP′ و QQ′ ـ عتبتان تشكلتا في مستويات انزلاق هذين الانخلاعين .

٢ ـ ٢ ـ ٣ ـ العيـوب السطحية :

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

آ ــ المستويات ذات التوضع الخاطىء : وتحصل مثل هذه المستويات أثناء عملية التبلور عندما يكون توضع ذرات أحد المستويات توضعا خاطئاً أي بحيث يكون المستوي منحرفا إلى أحــد الاتجاهات بمقدار مسافة ذرية واحدة •

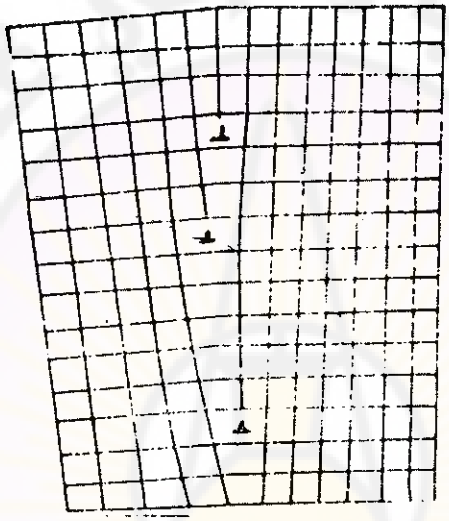
ب ــ حدود البلورات التوأمية : وتحدث مثل هذه العيوب عند التشكيل اللدن للمعدن عندما ينقلب أحد أجزاء البلورة عند أحد المستويات البلوريــة لتصبح الهياكل الشبكية في الجزء المنقلب مناظرة للهياكل الشبكية الباقية في الجانب الآخر من مستوي التناظر والذي يُسمى مستوي التوأمة (انظر الشكل ٢ ــ ٢٠) •



الشكل (٢ ــ ٢٠) : حدود البلورات التوامية

جـ ــ حدود الأطوار المتشكلة : وتحدث عندما يبدأ أحد الاطوار بالتحــول إلى طور آخر فعندما يبدأ التحول في إحدى البلورات تكونقد أصبحت مكونة من جزءين أحدهما من الطور الجديد والآخر من الطور السابق ويفصل بين هذين الجزءين سطح مشترك تكون ذراته تابعــة لكلٍ من الطورين بآن واحد •

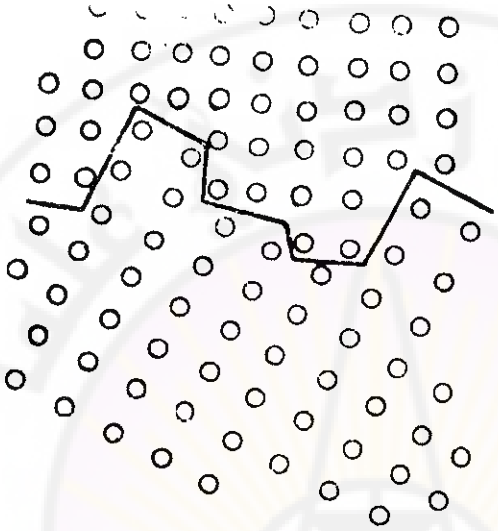
د ــ حدود البلورات الاضافية : إذا وجد في بلورة ما عدد من الانخلاعات الخطية المتوازية والمتساوية في الاشارة وكانت هذه الانخلاعات متقاربة (انظر الشكل ٢ ــ ٢١) فانها تجعل جزئي البلورة يميلان على بعضهما بعضا بزاوية ما وتشكل نهاية المستويات الاضافية للانخلاعات مايشبه السطح الفاصل بين جزئي البلورة .



الشكل (٢ ــ ٢١) : حدود البلورات الاضافية .

هـ ــ 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 قبولا هو أن حدود البلورات ليست سطوحا مستوية أو ناعمة وانما كلها تعرجات وتداخلات صغيرة ذات مقاييس من مرتبة الابعاد الذرية في الهياكل الشبكية(انظر الشكل ٢ ــ 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 ــ ٢٢) : حدود البلورات .

و ــ حدود الاطوار : وهي لاتختلف 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 ــ أي دراسة الشكل الهندسي للهياكل الشبكية وكيفية توضع الذرات في هذه الهياكل .وتأتي في مقدمة هذه الطرق طريقتا الاشعة السينية والاشعة الذاتية .

المجموعة الثانية : وتستخدم طرق هذه المجموعة للتعرف على البنية الخارجية للبلورات المعدنية ــ أي تحديد شكل البلورات وأبعادها ونوعية الاطوار المتبلورة ، ويتم ذلك باستخدام المجهر الضوئي الذي يمكن بوساطته أن نحصل على تكبير من مرتبة 10^3 مرة أو المجهر الالكتروني الذي يمكن بوساطته الحصول على تكبير من مرتبة 10^5 مرة .

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

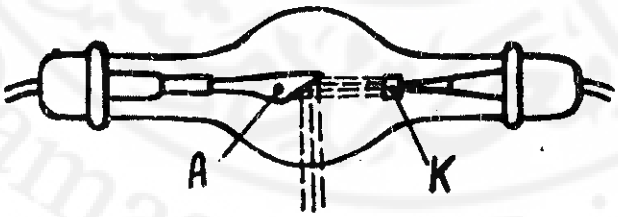
المجموعة الرابعة : وتضم طرق الكشف عن الاخطاء والعيوب الموجودة في قطع الآلات والمسبوكات المختلفة وبالتالي تحديد مدى صلاحية هذه القطع

والمسبوكات للاستخدام • ويدخل ضمن هذه المجموعة بعض الطرق من المجموعات الثلاث التي سبق ذكرها ـ مثل الاشعة السينيـــة والمجهـــر الضـــوئي والمقاومة الكهربائية بالاضافـــة الى طرق أخرى مثل الطريقة المغناطيسية وطريقة الامواج فوق الصوتية وغيرها •

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

٣ ـ ١ ـ طرق دراسة البنية الداخلية للمعادن :

٣ ـ ١ ـ ١ ـ الاشعة السينية : وهي اهتزازات الكترومغناطيسية ذات موجات قصيرة جداً ، إذ يتراوح طول موجاتها بين A° (2 ÷ 0,005) ، وكلما كان طول موجات الاشعة أقصر عُدّت أقسى ، حيث المبدأ يتـــم حسب ماهـــو موضح في الشكل (٣ ـ ١) حيث يثبت في نهايتي انبوب زجاجي قطبان احدهما المهبط K وهو ملف من التنغستين والثاني المصعد A وهو قضيب معدني اسطواني الشكل تقريبا ، 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 القطـــب



الشكل (٣ ـ ١) : توليد الاشعة السينية

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

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

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

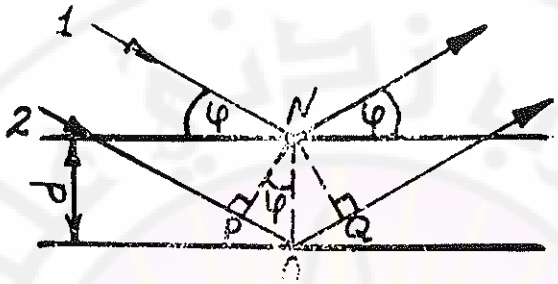
أي أن سرعة الالكترونات ستكون أكبر كلما كبر توتر التيار الموصول على الأنبوب • وباصطدام الالكترونات بالمصعد فانها سوف تفقد سرعتها ،ويتحول الجزء الاكبر من قدرتها الحركية الى حرارة بينما جزء صغيرمن هذه القدرةسيتحول الى اهتزازات الكترومغناطيسية ، ويمكن حساب طول موجة الاشعاعات الناتجة عن ذلك من معادلة إنشتاين :

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

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 للهياكل الشبكية وأبعاد هذه الهياكل • فلقد أصبح معروفا 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 البعد بينهما d كما في الشكل (٣ ــ ٢) فان الفرق بين مسـاري الشعاعين ١ و 2 المنعكسين عن المستويين الاول والثاني سيكون مقداره : PO + OQ .



الشكل (٣ ــ ٢) : إنكسار الاشعة السينية

يتوافق الشعاعان ويقوي أحدهما الآخـر عندما يكون الفـرق بين طولي المسارين مساويا الاضعاف الصحيحة لطول موجة الاشعة أي عندما يكون :

$$PO + OQ = n\lambda \qquad (3.3)$$

حيث n عـدد صحيح ويساوي : ١، ٢، ٣، ٠٠٠ الخ .

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

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

وتسمى هذه العلاقة علاقـة براغ ويمكن بوساطتها معرفة البعد d بين المستويين إذا علم طول موجة الاشعة وزاوية الانكسار φ حيث إن تداخل الإشعة بعد انعكاسها يتم عندما يكون فرق المسار مساوياً الاضعاف الصحيحة لطول الموجـة كما رأينا ، فالتداخل الاول يحصل عندما يكون $n = 1$ والتداخل الثاني عندما $n = 2$ وهكذا . فبالتقاط الاشعة المنعكسة عن مستويات الهياكل الشبكية على فيلم حساس تتضح نقاط التداخلين الاول والثاني .... الخ ، ومن هـذه

النقاط يمكن معرفة الزاوية θ وبالتالي حساب البعد بين المستويات .

٣ – ١ – ٢ – الاشعة الذاتية : إن فقدان الالكترونات لسرعتها عند اصطدامها بالمصعد لايتم على مرحلة واحدة بل غالبا مايكون على عدة مراحل ، لهذا فإن الاشعاعات المتولدة تكون متفاوتة في طول موجاتها . إضافة لهذه الاشعاعات فانه غالباً ما يتولد نوع من الاشعة التي يتعلق طول موجاتها بنوع المعدن المصنوع منه المصعد وتسمى هذه الاشعة الاشعة المميزة أو الاشعة الذاتية للمصعد .

تنطلق الاشعة الذاتية للمصعد عندما يصل التوتر في الانبوب أو الصمام حداً معيناً يختلف باختلاف معدن المصعد وعندئذ تصبح القدرة الحركية للالكترونات القادمة إلى المصعد كبيرة إلى حدٍ تستطيع معه اقتلاع بعض الكترونات المدارات الداخلية لذرات المصعد ، فتأتي الكترونات أخرى من المدارات الخارجية ذات القدرة الداخلية الاكبر لتحتل أماكن الالكترونات المقتلعة وفارق القدرة ينطلق على شكل اشعاعات مميزة أو ذاتية . فعندما يكون الالكترون القادم لاحتلال مكان الالكترون المقتلع قادما من الطبقة المدارية الثانية L تسمى الاشعة الناتجة أشعة K_{α} ، أما إذا كان هذا الالكترون قادماً من الطبقة المدارية الثالثة فتسمى الأشعة الناتجة أشعة K_{β} .

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

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

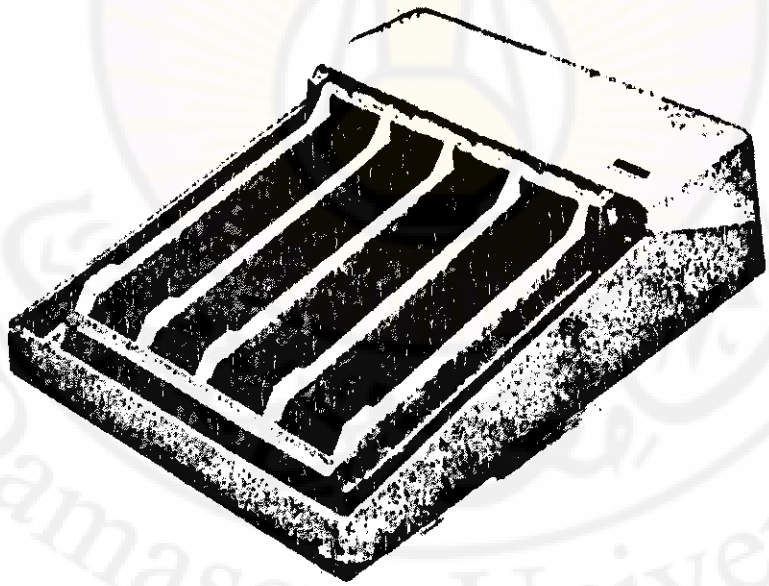
الطرق كلها متشابهة من حيث المبدأ إلا أنها تختلف عن بعضها بعضا باختلاف نوع العينات المستخدمة في الفحص من جهة وبنوعية الاشعة من جهة أخرى • فمنها مايستخدم العينات ذات البلورة الواحدة ومنها مايستخدم عينات كثيرة البلورات، أما من حيث نوعية الاشعة المستخدمة فمن هذه الطرق ماتستخدم الاشعة المتجانسة في طول موجاتها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

٣ ـ ٢ ـ طرق دراسة البنية الخارجية للبلورات المعدنية :

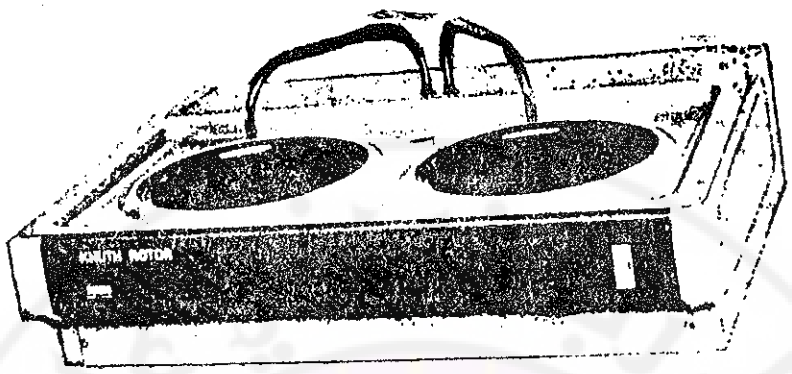
إن البلورات المعدنية في المعادن والخلائط المعدنية تختلف في أحجامها ضمن نطاق واسع ولكن تبقى في كل الحالات اصغر من أن نستطيع تمييزها بالعين المجردة • لهذا فلا بد من تكبيرها عددا من المرات بوساطة المجهر كي نستطيع التعرف على أشكالها ونوعيتها وكيفية توزعها في البنية ، وهكذا فان المجهر يعد من الوسائل الهامة في فحص البنية الصلبة للمعادن بخاصة وأنه بالفحص المجهري 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 لايمكن للضوء أن يخترقها ، لهذا فان فحص هذه العينات يتطلب أن يكون المجهر مجهزاً بتجهيزات خاصة بحيث بدلاً 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 مايكون غير متجانس وغير مستوٍ ، لذا فانه لابد من تحضير سطح العينة المعدة للاختبار تحضيرا خاصا • وسنورد فيما يلي مراحل تحضير العينة المعدة للفحص بالمجهر الضوئي :

٣ ـ ٢ ـ ١ ـ تحضير العينات للفحص بالمجهر الضوئي : تقطع العينة المعدنية عادةً من المشغولة المراد معرفة بنيتها البلورية ، وبعد أن يسوى سطحها (إذا كان خشنا 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 الاوراق حتى تختفي الخطوط الناجمة عن الجلخ على الورقة السابقة • والجلخ هذا يمكن ان يتم يدويا على أوراق موضوعة على سطوح أفقية ناعمة أو مثبتة على جهاز خاص لهذه الغاية كالمبين في الشكل (٣ ــ ٣)، أو آليا باستعمال أوراق الجلخ المثبتة على قرص دوار كما في الشكل (٣ ــ 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 ــ ٣) : جهاز لتنعيم سطح العينة مثبتة عليه أوراق الجلخ

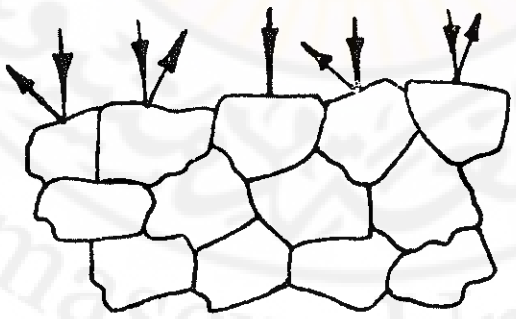


الشكل (٣ ــ ٤) : القرص الدوار مثبتة عليه أوراق الجلخ

للسابق ومغطى بقطعــة من اللباد أو قماش النايلون ذي الخيوط الناعمة بعد تبليل اللباد أو القماش بمستحلب يحتوي على حبيبات ناعمة من الالومينا (أوكسيد الالمنيوم) •وتستعمل في بعض الحالات مساحيق من أكاسيد أخرى مثل أوكسيد الحديد أو الكروم وغيرها • ويستمر التلميع حتى يصبح السطح لماعا خاليا من أي أثلام أو خدوش • والتلميع يمكن أن يتم يدويا بمسك العينة باليد أثناء تلميعها على القرص الدوار أو آلياً باستعمال حامل العينات المسائل للمستعمل في عملية الجلــخ •

إن السطح المستوي واللماع للعينة لايزال غير صالح للفحص المجهري إذ أن سطوح البلورات السطحية كافة قد أصبحت في مستو واحد وان انعكاس الضوء عن هذه السطوح سيكون بالشدة نفسها ولايمكن في هــذه الحالــة التمييز بين البلورات لذلك تعقب عملية التلميع عملية أخرى هي عملية التخريش (أوالتنميش) ــ أي تغطيس العينة بأحد المحاليل المخرشة والتي تختلف باختلاف نوع العينة ، وغالباً ماتكون هذه المحاليل حموضا مخففة بالماء او الكحول ، أو بعض الاملاح المذابة في احدى هاتين المادتين (فمثلا يستخدم في أغلب الاحيان محلول مؤلف من ١ ــ ٥سم^3 من حمض الآزوت HNO_3 لكل ١٠٠سم^3 من الكحول) • ووظيفة

المحلول المخرش هي اذابة طبقة قشرية رقيقة جـدا من السطح بحيث يصبح سطح البلورة هو أقرب مستوياتها الذرية المتماسكة من السطح الافقي اوالسطح المجاوخ للعينة ، إذا فالذرات التي ستذوب في المحلول المخرش هي الذرات ضعيفة الارتباط بالبلورة نتيجة لوجودها في أماكن أو نقاط تعاني تشـوهاً كبـيراً في الهياكل الشبكية ، وأكثر المناطق تشوها هي الزوايا والحروف الفاصلة بـين البلـورات المتجاورة وسطوح البلورات التي غالباً ماتتشكل فيها نتيجة الجلـخ والتلميع طبقة رقيقة جداً ذات بنية تكاد تكون أقرب الى الامورفية منها إلى البلورية نظرا لكثرة التشوهات فيها وتسمى طبقة بايلبي ، وباتالخلص من هذه الطبقـة يصبح سطح البلورة كما ذكرنا أحد مستوياتها الذرية المنتظمة • عندئذ سوف يصبح لكل بلورة سطحها الخاص الذي يميل على السطح الاصلي بزاوية تختلف عن زاويـة ميل سطح البلورة المجاورة (انظر الشكل ٣ ــ ٥) ، وبالتالي عنـد وضع هذه العينة تحت المجهر فسوف تكون شدة الاشعة المنعكسة عن سطح كـل بلورة مختلفة باختلاف زاوية ميل سطحها هذا على السطح الافقي وهكذا يصبح مـن السهل التمييز بين البلورات التي تتوضح حدودها ايضاً لكون الذوبان في المحاليل المخرشة يكون على أشده عند الحدود الفاصلة بين البلورات • وفي البنية متعددة الأطوار يكون تأثر كل من الاطوار الموجودة فيها بالمحاليـل المخرشة مختلفا عن



الشكل (٣ ــ 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 •

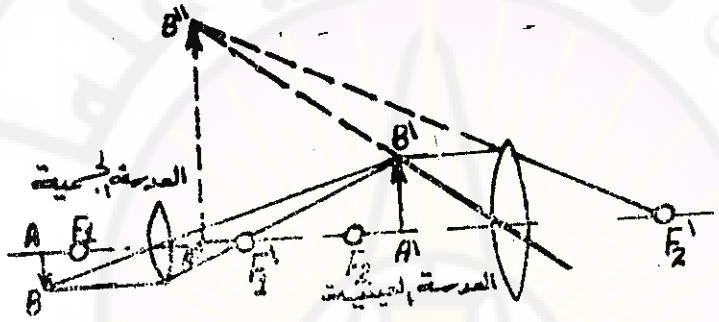
ونود أن ننوه الى أنه تستخدم في بعض الاحيان لتخريش العينات محاليل تكوّن على سطح العينة رواسب ناتجة عن التفاعل بين مركبات المحلول المستخدم• وتختلف سماكة الراسب باختلاف نوع الطور المتشكل عليه هذا الراسب مما يتيح الحصول على درجات لونية مختلفة عند الفحص المجهري للعينات المخرشة بهذه المحاليل •

ويمكن أحياناً أن تستخدم طريقة تخريش اخرى تدعى بطريقة التخريش الحراري ، وتتلخص هذه الطريقة في تسخين العينة المراد فحصها مجهريا في وسط مؤكسد تتراوح درجة حرارته بين ٢٠٠ ــ 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 مجهريا سواءً أثناء تسخين العينة أو أثناء تبريدها •

٣ ــ ٢ ــ ٢ ــ 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 والي تتم منها الرؤية فتسمى العدسة العينية • ويوضح الرسم التخطيطي المبين في الشكل (٣ ــ 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 مجموعتي العدسات ووضع الجسم بحيث يتم تشكل هذا الخيال بين العدسة العينية ومحرقها ، فاذا نظرنا من العدسة العينية فاننا سوف نرى للجسم خيالا وهميا 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 ـ ٦) : مبدأ التكبير في المجهر الضوئي

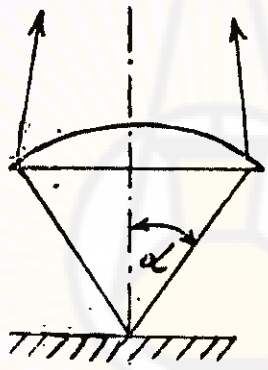
ويجب أن نذكر هنا أن تكبير المجهر يمكن زيادته ولكن ضمن حدود معينة ، فزيادة التكبير خارج هذه الحدود يصبح عديم الفائدة ولا يظهر أي تفاصيل جديدة .

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 فان المبالغة بتكبير العدسة العينية لافائدة منها . أما مقدرة الفصل (أو التفريق) فهي أصغر مسافة (d) بين خطين تمكننا العدسة من التمييز بينهما ، وتتعلق هذه المسافة بطول موجة الضوء المستخدم (λ) وبما يسمى

الفتحة الرقمية للعدسة (a) حيث :

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

أي ان مقدرة العدسة على الفصل تكون أكبر كلما كا نطول موجةالاشعة الضوئية اصغر او كلما كانت الفتحة الرقمية للعدسة أكبر ، حيث ان ازديادالمقدرة على الفصل (أو التفريق) يعني نقصانقيمة (d) ، أما الفتحة الرقمية للعدسة فهي جيب نصف الزاوية الرأسية (α) لمخروط الاشعة المنعكسة عن نقطةمامن سطح الجسم والتي يمكن للعدسة أن تلتقطها لتكوين اخليال(انظر الشكل٣ــ٧)٠



الشكل (٣ ــ ٧) : الفتحة الرقمية للعدسة

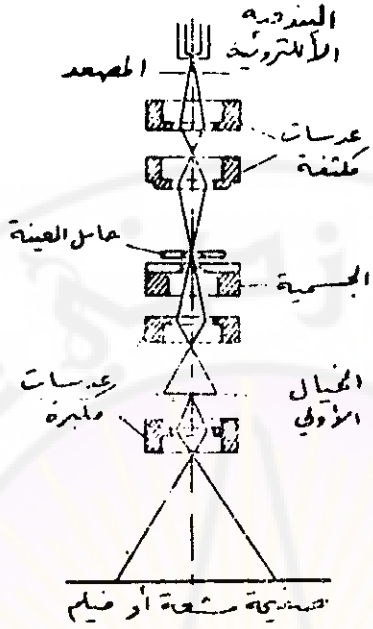
ومن البدهي أن هذه الزاوية لايمكن أن تكون أكبر من ٩٠° أو بالاحرى يكون الحد الاعظمي النظري للفتحة الرقمية هو جيب ٩٠° = ١ ، ولكن عملياً لايمكن صنع عدسات تزيد فتحتها الرقمية عن ٩٥ر٠ ، غير أنه يمكن زيادة الفتحة الرقمية للعدسة باستبدال الهواء الفاصل بين العدسة وسطح الجسم بوسط ما قرينة انكساره n أكبر من « ١ » وكثيرا مايستعمل لهذه الغاية زيت بذور الكتان والذي قرينة انكساره نحو ٥ر١ ، عندئذ تصبح الفتحة الرقمية :

$$a = n \cdot \sin \alpha \qquad (3.6)$$

لقد ثبت عملياً أن مقدرة الفصل عند المجهر الضوئي لاتتعدى ٢ر٠ميكرونا (أي ٢٠٠٠ أنغستروم)، أي انه لايمكن استخدام المجهر الضوئي لتمييز دقائق البنية التي تقل أبعادها عن ٢ر٠ ميكرونا • 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 التي تجري دراستها •

٣ ــ ٢ ــ ٣ ــ المجهر الالكتروني : انتشر في السنوات الاخيرة استخدام المجاهر الالكترونية والتي تتمتع بمقدرة على الفصل تزيد كثيرا جدا عن مثيلاتها في المجاهر الضوئية مما يمكن من دراسة تفاصيل أدق في بنية المعادن • وتستخدم في المجاهر الالكترونية الاشعة الالكترونية المنطلقة من مولدٍ خاص يسمى المدفع الالكتروني، وتتميز هذه الاشعة بأن موجاتها قصيرة جدا ، إذ تتراوح أطوال موجاتها بين (٠٤ر٠ ÷ ١٢ر٠) أنغستروماً مما يتيح امكان الدراسةالدقيقة لعناصر البنية التي أبعادها من مرتبة أبعاد الهيكل الشبكي (أي ٢÷ ٥ أنغستروامات) •

يوضح الشكل (٣ ــ ٨) مبدأ استخدام الاشعة الالكترونية في الفحص المجهري (أي بشكل تخطيطي مبدأ المجهر الالكتروني) ، حيث تنبعث حزمة الالكترونات من المهبط (اولب من معدن التنجستين) عند تسخينه • ويؤثر بين المهبط والمصعد مجال كهربائي هائل ذلك لان فرق الكمون بين المهبط والمصعد يتراوح بين ٥٠ ÷ ١٥٠ كيلو فولطا ، ويؤدي هذا الى تحرك الالكتروناتباتجاه المصعد بسرعة هائلة • وتعبر حزمة الالكترونات ثقباً في المصعد الى العدسات المكثفة • والعدسات في المجهر الالكتروني هي وشائع مغناطيسية ، اذ بمساعدة تيار التحريض المار بكل من هذه الوشائع فان الاشعة الالكترونية المارة عبر



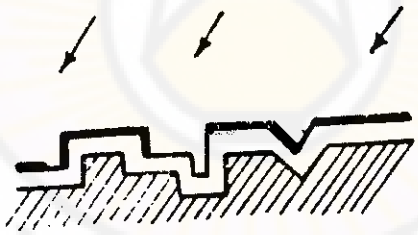
الشكل (٣ ــ ٨) : رسم تخطيطي للمجهر الالكتروني

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

يتضح لنا مما ورد آنفاً أن المجهر الالكتروني يعمل بمبدأ اختراق الاشعة الالكترونية لعينة الاختبار لذلك فانه بعد ان يتم تحضير العينة بالطريقة نفسهاالتي اتبعناها للفحص بالمجهر الضوئي ، فأما أن تقطع شريحة رقيقة جدا من سطحالعينة بوزوز 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 باذابة المعدن من تحتها ويجري الاختبار على القشرة الناتجة والتي تأخذ تعرجاتها تعرجات السطح الاصلي نفسها قبل عملية الأكسدة .

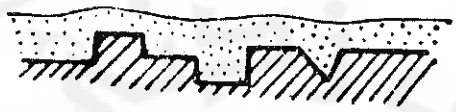
إن أسهل طرق تشكيل الطبعة هي طلاء السطح بمادة بلاستيكية وتركها حتى تتصلب ، وبعدئذ تنزع وتكون جاهزة للاستعمال مباشرة حيث يأخذ سطحها السفلي شكل سطح العينة نفسه بينما يكون سطحها العلوي مستويا تقريباً (انظر الشكل ٣ ــ ٩)، واختلاف سماكة القشرة حسب شكل السطح يسهل عملية الاختبار . غير أن من سيئات هذه الطريقة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



الشكل (٣ ــ ٩) : اعداد الطبعة البلاستيكية لفحصها بالمجهر الالكتروني

إن أكثر الطرق استعمالا هي طريقة الطبعة الفحمية ، حيث يتم ترسيب طبعة من الفحم على سطح العينة وذلك بتبخير الفحم فو ق العينة في حجرة مفرغة من الهواء . غير ان القشرة المتشكلة تكون متجانسة من حيث السماكة (انظر الشكل ٣ ــ ١٠) ، لذلك ولاظهار تعرجات سطح العينة يلجأ عادة الى عملية التضليل

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



الشكل (٣ ـ ١٠) : اعداد الطبعة الفحمية لفحصها بالمجهر الالكتروني

٣ ـ ٣ ـ طرق دراسة التحولات التي تحدث في المعادن والخلائط المعدنية:

يتبع 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 للخليطةالمعدنية تتعلق بالدرجة الاولى بتركيب هذه الخليطة وبالتغيراتالتي تطرأ على بنية هذه الخليطة بسبب معاملتها حراريا أو ميكانيكيا أو معاملتها حراريا وميكانيكيا في آن واحد •

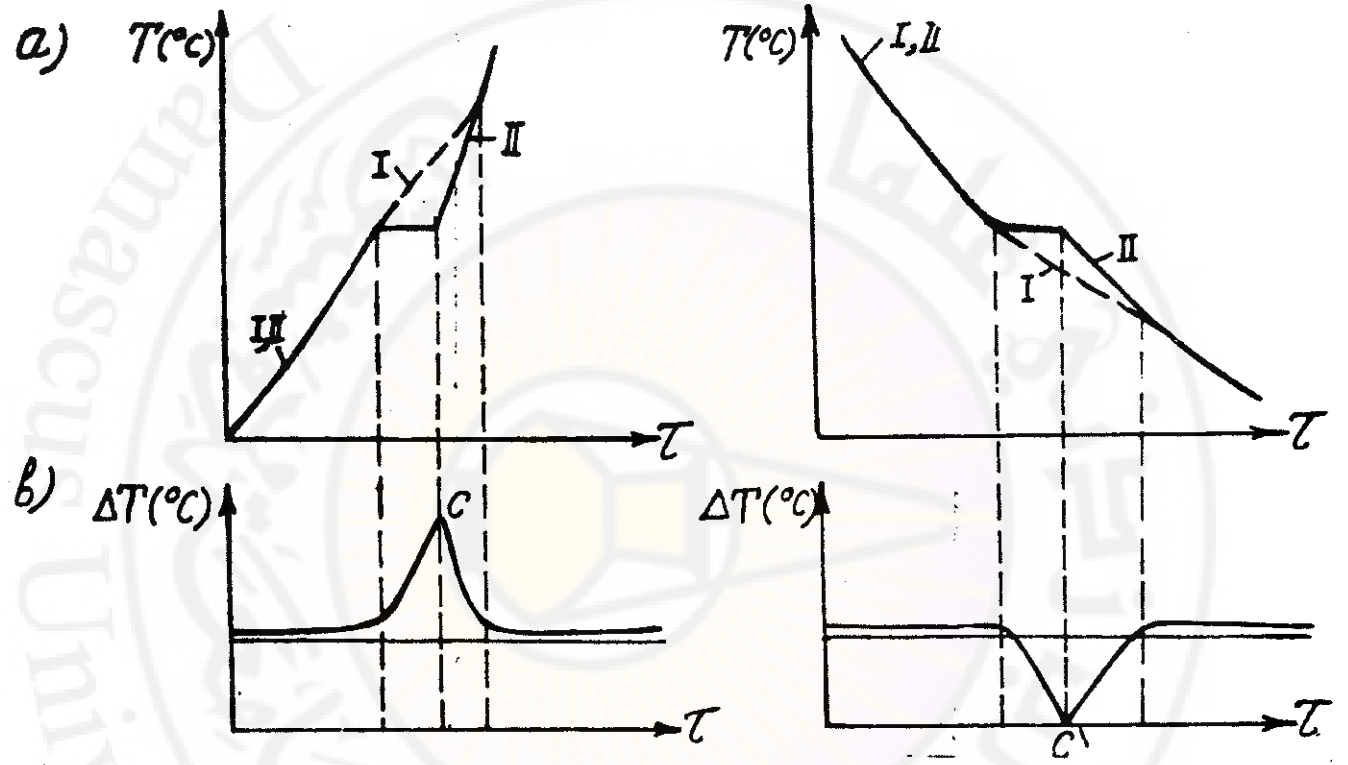
غالباً ماتتم دراسة علاقة الخواص الفيزيائية بتغير تركيز هذه الخليطة (أي تركيبها الكيميائي) ودرجة حرارتها بالاضافة لعامل الزمن • وتتيح هذهالدراسة المتكاملة للكشف عن جوهر التحولات التي تحدث في الخلائط المعدنية بتغير العوامل الثلاثة آنفة الذكر وهي : التركيز ـ الحرارة ـ الزمن • وسنورد فيما يلي بعض الطرق الفيزيائية المتبعة في الوقت الحاضر لدراسة التحولات في المعادن والخلائط المعدنية :

٣ ـ ٣ ـ ١ ـ طريقة التحليل الحراري :

تترافق التحولات التي تحـدث في المعادن والخلائط المعدنية عادة بانطـلاق حرارة أو بامتصاصها ، لهذا فان الغاية من التحليـل 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 علـى درجات الحرارة بتغير الزمن ومن ثم رسم المنحنيات التي تبين علاقة درجة حرارة المعدن (أو الخليطة) بالزمن ، وبالتالي فان 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 يـدل 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 السائلـة الى الصلبة أو العكس) فان هذا التحول يظهر على شكل خط أفقي ثم يتابـع المنحني سيره بالشكل نفسه أي كما لو كان استمرارا للجزء ماقبل الخط الافقي (انظر المنحني II على الشكل ٣ ـ ١١ a) •

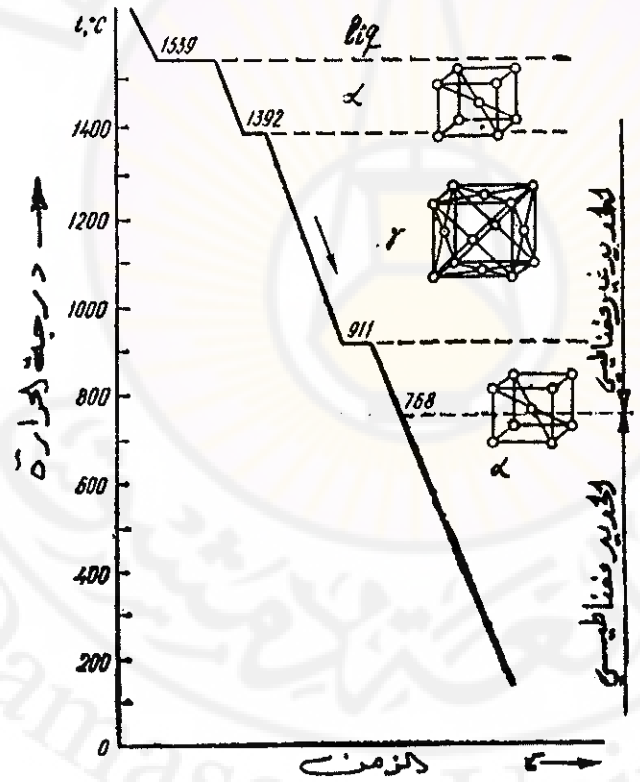
ونود أن ننوه أنه في الوقت الحاضر تستخدم مايسمى الطريقة التفاضلية للتحليل الحراري ، حيث يتم في هذه الحالة تعيين الفرق بين درجات حرارةالمعدن المراد دراسته وعينة معدنية أخرى تستخدم كنموذج ولاتمـر هذه الاخـيرة بأية تحولات وذلك أثناء تسخينهما أو تبريدهما معـا وفي الشروط نفسـها • ويبين الشكل (٣ ـ ١١ b) منحنيات التسخين والتبريد الناتجة باستخدام هـذه الطريقة ، حيث نلاحظ أن النقاط الاعظمية (الذروة) على الشـكل السفلي تعني نهاية التحول الطوري عند المعدن المختبر •



الشكل (٣ ــ ١١) : رسم تخطيطي لتغير درجات الحرارة (°C) T ولفروق درجات الحرارة (°C) ΔT اثناء تسخين العينة القياسية (المستخدمة للمعايرة) والعينة الجاري اختارها (أي التي يحدث بها تحول طوري) . وتبريدها .

I – العينة القياسية . II – العينة الجاري اختبارها

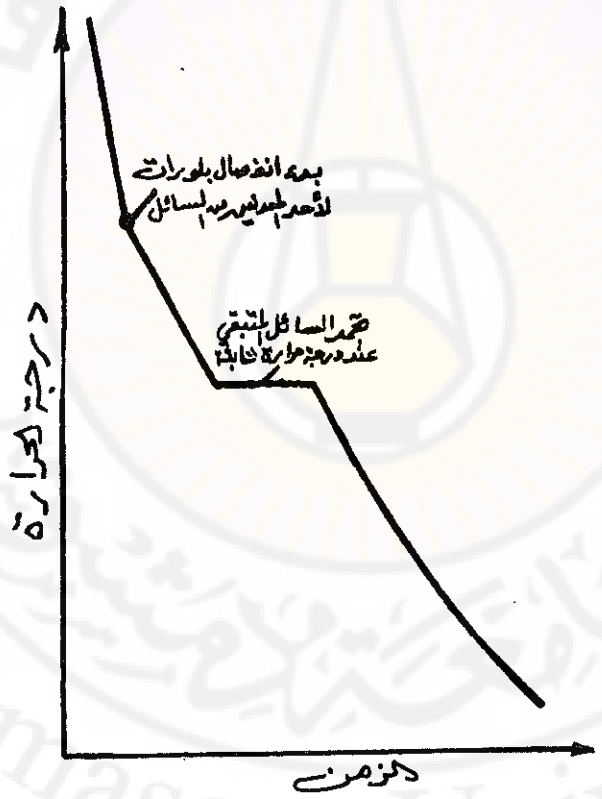
وتستخدم طريقة التحليل الحراري هذه أيضا لدراسة التغيرات الآلوتروبية في بعض المعادن التي يمكن أن يحدث بها هذا النوع من التغيرات . فالتغير الآلوتروبي : تغير شكل الهيكل الشبكي للمعدن في الحالة الصلبة وعند درجة حرارة معينة ، ويرافق هذا التغير ثبات في درجة الحرارة على منحني التسخين أو أو التبريد مما يدل على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



الشكل (٣ ــ ١٢) : منحني تبريد الحديد

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

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



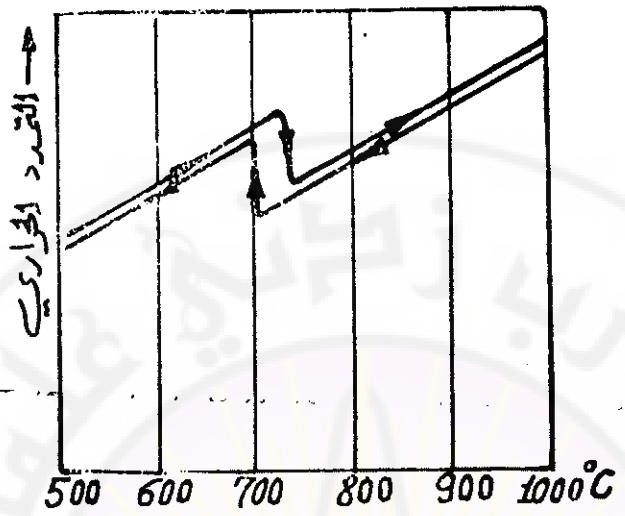
الشكل (٣ ــ ١٣) : منحني تبريد خليطة من معدنين.

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

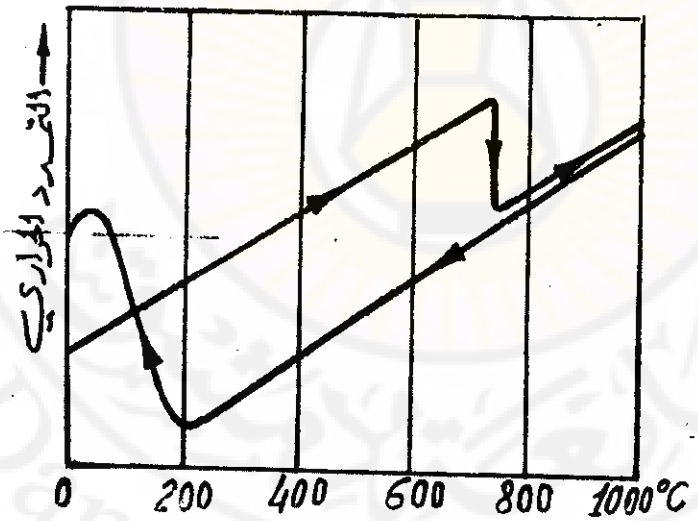
٣ ــ ٣ ــ ٢ ــ الطريقة التمددية :

تقوم هذه الطريقة على حقيقة أن حجم المعدن (أو الخليطة المعدنية) يتغير أثناء التحولات الطورية أو الآلوتروبية وذلك عند بلوغ المعدن (أو الخليطة) لدرجات حرارة التحول . فعند بلوغ درجات الحرارة هذه فان تغير حجم العينة المعدنية لايتوقف على مبدأ التمدد (أو التقلص) الحراري بقدر مايتوقف على التحولات التي تتم ، إذ يحدث في هذه الحالة تمدد حاد (أو تقلص حاد) ، مما يؤدي الى تغير مفاجىء في منحني التمدد (أو التقلص) إلى أسفل أو إلى اعلى (انظر الشكلين ٣ ــ ١٤ و ٣ ــ ١٥) .

فالشكل (٣ ــ ١٤) يبيّن أن التغير من أوستينيت الى برليت يرافقه تغير مفاجىء في الحجم ، فالحديد الصافي عندما يتحول من حديد γ **الى حديد** α يرافقه ازدياد في الحجم أي تمدد ، وهذا التمدد يحدث أيضاً في خلائط الحديد والكربون وإن لم يكن بالمقدار نفسه . إذاً فتحولُ البنية البرليتية الى أوستينيت يرافقه تقلص في الحجم بينما من أوستينيت الى مارتسنيت يرافقه تمدد حجمي أكبر من ذلك الذي يرافق التحول الى برليت (انظر الشكل ٣ ــ ١٥) ، ذلك لأن التحولَ



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



الشكل (٣ ـ 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 تمدد ، ويزيد من مقدار هذا التمدد في حالة التحول الى مارتنسيت بقاء ذرات الكربون الزائدة عن قابلية الذوبان مذابة بشكل قسري ، الأمر الذي يجعل الهيكل الشبكي لبلورة المارتنسيت يأخذ حجماً أكبر من الهيكل الأصلي لحديد α .

٣ – ٢ – ٣ – طريقة قياس المقاومة الكهربائية :

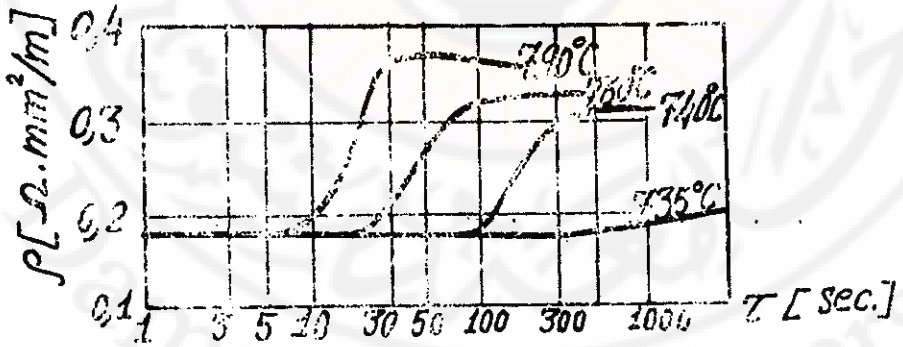
تعد طريقة قياس المقاومة الكهربائية النوعية من أكثر الطرق الفيزيائية استخداماً .

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

$$\rho = RS/l \qquad [\Omega \cdot mm^2/m]$$

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

ويُبيِّن الشكل (٣ – ١٦) مثالاً 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 اليها الفولاذ • نلاحظ من الشكل (٣ ــ ١٦) أن المقاومة النوعية للبرليت ثابتة تقريبا بتغير درجة الحرارة إلا أن هذه المقاومة تبدأ بالتزايد عندما يبدأ البرليت بالتحول الى 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 ــ ٣ ــ ٤ ــ طريقة اقتفاء أثر العناصر المشعة :

إن الهدف الاساسي 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 للمعدن 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 ــ وهي أنوية الهليوم ذات الشحنة الموجبة •

أشعة β ــ وهي تيار من الالكترونات المتحركة بسرعة قريبة من سرعة الضوء •

أشعة γ ــ وهي أشعة كهرومغناطيسية تشبه الاشعة السينية وإن كانت أطوال أمواجها أصغر بكثير •

وتتم الدراسة بطريقة اقتفاء الأثر على الشكل التالي : يضاف العنصر المشع الى المعدن المطلوب دراسته أثناء عملية صهر هذا المعدن • وبعد تجمد 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 نوعٍ خاص ، ثم قمنا بعد ذلك بتحميض 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 •

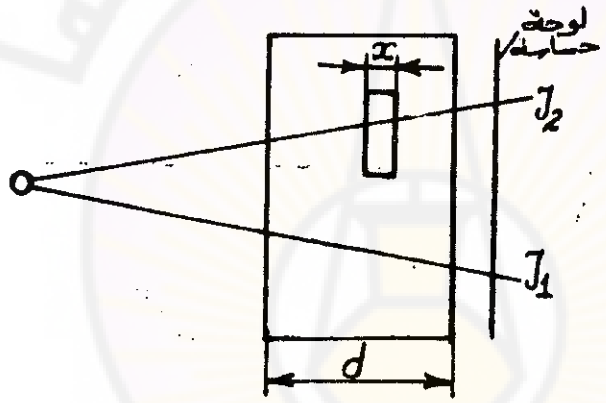
٣ ـ ٤ ـ الطرق الفيزيائية للكشف عن العيوب في المعادن والخلائط المعدنية :

كثرت في الآونة الأخيرة الاختبارات والأبحاث التي تجرى للكشف عن العيوب التي يمكن أن تتواجد في قطع الآلات والمسبوكات والوصلات اللحامية وغيرها • وعلى الرغم من تنوع طرق الاختبار والبحث في هذا المجال واختلافها من حيث المبدأ إلاّ 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 ـ ٤ ـ ١ ـ 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 معدنيـة كالمبينة في الشكل (٣ ــ ١٧) سماكتها (d) وتحتوي على فجوة أو فقاعة غازيـة بداخلها سـماكتها (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 ــ ١٧) رسم تخطيطي لطريقة كشف العيوب باستخدام الاشعةالسينية

فاذا فرضنا أن شدة الشعاع السيني المسلّط على القطعة المعدنيـة (J_0) فـان :

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

حيث : d ــ سماكة القطعة المعدنية •

μ ــ عامل تناقص شدة الأشعة ويتكون من عاملين :

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

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

أما شدة الشعاع (J_2) فتعطى بالعلاقة :

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

ومنه فان :

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

وبما أن شدة الشعاعين (J_1) و (J_2) يمكن تحديدها على اللوحة فانه يمكن من العلاقة الاخيرة تعيين سماكة العيب الموجود في القطعة المعدنية 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 الالمنيوم التي تبلغ سماكاتها (٣٢٥ ÷ ٢٧٥ مم أو سبائك النحاس التي تصل سماكتها الى (٤٠ ÷ ٥٠ مم) ••• الخ •

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

٣ ـ ٤ ـ ٢ ـ 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 :

١ً ــ سهولة الاستخدام وقلة الكلفة .

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

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

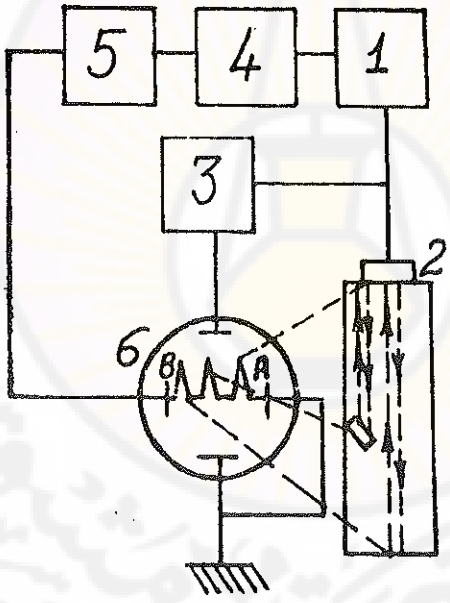
أما المبدأ في هذه الطريقة فهو كالتالي :

إذا أرسلنا من نقطة ما على سطح القطعة المعدنية موجات فوق الصوتية عالية التردد (أي مقدرة بواحدات الميغا هرتز) بشكل عمودي على هذا السطح ، فان 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 فان التقاطهما سيكون بفارق زمني يتناسب طرداً مع سماكة القطعة (أي المسافة بين السطحين) وعكساً مع سرعة انتشار الموجات ضمن مادة القطعة . وبمعرفتنا لسرعة انتشار الموجات في مادة القطعة والفارق الزمني بين الانعكاسين فاننا نستطيع أن نحسب سماكة القطعة .

وفي حال وجود عيب ما داخل القطعة (فجوة أو فقاعة غازية أو شق) وعلى عمق ما من سطح القطعة فان 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 نحتاج فيها الى 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 للعيب في حال وجوده •

يُبيِّن الشكل (٣ ــ ١٨) رسماً تخطيطياً لطريقة استخدام الموجات فوق الصوتية للكشف عن العيوب في القطع المعدنية ، إذ نلاحظ من الشكل أن المولد (1) يقوم بإرسال نبضات كهربائية الى محول كهربائي موجود بالرأس الباحث (2) ، الذي يقوم بإرسال اهتزازات مرنة الى داخل القطعة عبر صفيحة من الكوارتز موجودة أيضا بالرأس الباحث وتشكل رأس الإرسال • وتصل هذه



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

1 ــ مولد نبضات كهربائية . 2 ــ الرأس الباحث . 3 ــ جهاز الاستقبال ؛
4 ــ مولد ماسح . 5 ــ جهاز التوقيت . 6 ــ رسام الاشعة المهبطية .

الاهتزازات المرنة الى السطح المقابل فتنعكس 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 صمام الاشعة المهبطية مما يؤدي الى انحراف شعاع الصمام بالاتجاه الشاقولي . وفي الوقت نفسه الذي يرسل فيه المولد اهتزازاته ، يقوم جهاز التوقيت بتشغيل المولد الماسح (5) الذي يحرف شعاع الصمام بالاتجاه الافقي ، 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 متناسبا مع بعد العيب عن كلٍ من سطحي القطعة (انظر الشكل ٣ ــ ١٨) .

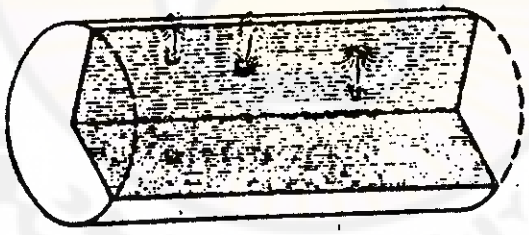
ونود أن ننوه الى أنه عند إجراء الاختبار فان الرأس الباحث لجهاز الكشف عن العيوب يتحرك بطول سطح القطعة ، ويكون هذا السطح مغطى بطبقة من الزيت.

٣ ــ ٤ ــ ٢ ــ 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

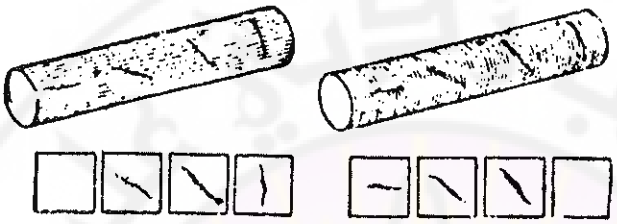
الفيرومغناطيسية وذلك في الاماكن التي توجد بها عوائق ذات نفاذية مغناطيسية منخفضة (كالشقوق والفصوص اللامعدنية وغيرها) • فاذا وضعنا قطعة فيرومغناطيسية (أو مسغنطة) في ساحة مغناطيسية فانه نتيجة التحريض المغناطيسي ستحاول خطوط الساحة المغناطيسية أن تسير متوازية في داخل القطعة ، وإذا اعترض طريق هذه الخطوط بعض 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) فترسب دقائق الاكسيد مشكلة خطوطاً متوازية ماعدا مكان العيب فانها تنحرف وتتكثف حول هذا المكان كما ذكرنا آنفاً (انظر الشكل ٣ ــ ١٩)•



الشكل (٣ ــ ١٩) : تكثف 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 مغنطة القطعة على مرحلتين ومن اتجاهين مختلفين بحيث تصبح الشقوق غير المرئية في المرحلة الأولى مرئية في المرحلة الثانية (انظر الشكل ٣ ــ ٢٠) .



الشكل (٣ ــ ٢٠) : مغنطة القطعة على مرحلتين بهدف كشف الشقوق السطحية مختلفة 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 الـذي تنتظم بموجبه الذرات أو بالأحرى شكل الهيكل الشبكي الذي يتبلور بموجبه هذا المعدن أو ذاك يحـدده نصف قطر ذرة المعدن وتركيبها الالكتروني وخواصها الفيزيائية الاخرى بما يتفق مع أفضل احتمال لانتظام الذرات كي تكون القدرة الحرة في المجموعـة أصغر ما يمكن وبالتالي لتكون المجموعة في الوضع الأقرب الى حالة التوازن .

إن حالة القدرة في مجموعة ما تتأثر بالاضافة لمخزون مكونات هذه المجموعة من القدرة بعوامل خارجية مثل الضغط ودرجة الحرارة . وكثيراً مانلاحظ بالاضافة 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 يمكن أن يعيد المعدن تبلوره وتتحول هياكله الشبكية من شكل الى آخر أي يتحول مـن طور صلب الى طور صلب آخر وتسمى هـذه الظاهـرة التحـول الآلوتروبي (Allotropic Transformation) ، وقد تعرفنا عـلى هـذه الظاهرة في الفصل السابق وسوف نتعرض لها بالتفصيل في نهـاية هذا الفصل وذلك عنـد دراستنا للتغيرات في الحالة الصلبة لبعض المعادن ، ولكن ما يجب أن نعرفه الآن أن سائر

التحولات الطورية والألوتروبية هي تحولات قابلة للانعكاس وتتم في درجات حرارة ثابتة .

٤ ـ ١ ـ القدرة الحرة وتأثيرها في التحولات الطورية :

بيّنا 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 بما فيها الانصهار والتبلور تحدث لأن الحالة الجديدة للمادة (أو للمجموعة) وفي ظروف جديدة تكون أكثر استقرارا من الحالة السابقة وذلك من حيث القدرة ـ أي أنها تتمتع بقدرة مختزنة أقل . ولتفسير هذا الامر نأخذ المثال البسيط التالي : نلاحظ من الشكل (٤ ـ ١) أن الكرة تميل لأ نتتدحرج من الوضع 1 الى الوضع 2 الاكثر استقرارا ذلك لأن قدرتها الكامنة في الوضع 2 أقل منها في الوضع 1 .

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

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



الشكل (٤ ــ ١)

F ــ القدرة الحرة للمجموعة .

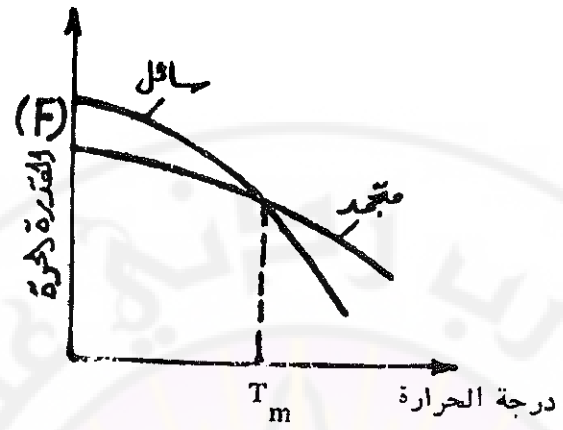
U ــ القدرة الداخلية أو القدرة المختزنة .

T ــ درجة الحرارة المطلقة .

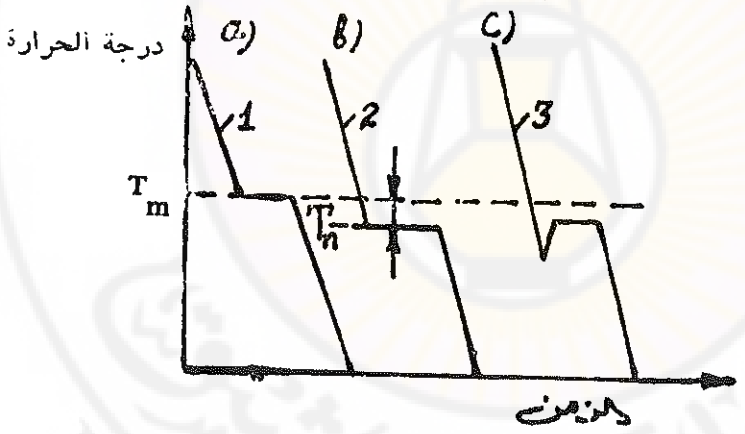
S ــ الانتروبيـــا .

وهنا يمكننا القول أنه كلما ازداد تالقدرة الحرة للمجموعة كانت المجموعة أقل استقرارا وإذا توافرت أمام هذه المجموعة إمكان للتحول الى حالة أخرى تكون قدرتها الحرة فيها أقل فان المجموعة سوف تتحـول مثلها في ذلك مثل الكرة في مثالنا السابق حيث بينا أن الكرة يمكن أن تتدحرج من الوضع 1 إلى الوضع 2 إذا لم تعترض طريقها أيـة عوائق تمنعها من ذلك .

إذا تغيرت الظروف الخارجية المؤثرة في مجموعة (تغيرت درجة الحـرارة مثلاً) فان القدرة الحرة تتغير ، ويختلف مقدار هذا التغـير بين الحالتين الصلبة والسائلة للمجموعة نفسها . ويبين الشكل (٤ ــ ٢) كيف تتغير القدرة الحـرة للسائل والصلب بتغير درجة الحرارة . فمن الشكل نلاحظ أنه عند درجات الحرارة الاعلى من T_m تكون القدرة الحرة للمجموعة في حالتها السائلة أقل منها في حالتها الصلبة ، أما عند درجات الحرارة الاقل مـن T_m يكون العكس تماما . لهذا فان المجموعة عند درجات الحرارة الاعلى من T_m يجب أن تتواجد في حالتها



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



الشكل (٤ ــ ٣) : منحنيات تبريد المجموعة

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

الحرارة هذه درجة حرارة التوازن أو درجة حرارة التبلور النظرية • لكن عملية التبلور لايمكن ان تحـدث عند درجة الحرارة T_m ذلك لان : $F_{liq} = F_{solid}$ وحتى يبدأ التبلور يجب أن تتوافر القوة المحركة لعملية التبلور هذه ، ويعدفارق القدرة الحرة للمجموعة مثابة القوة المحركة اللازمة لها للتحول الى الحالةالصلبة فمن منحنيات التبريد الموضحة على الشكل (٤ — ٣) نرى أن هذا ممكن فقط عندما يكون السائل مبرّداً إلى درجة حرارأقل من T_m ، وعندها تسمى درجة الحرارة التي يبدأ عندها التبلور عملياً درجة حرارة التبلور الحقيقيـة ، ويدعى تبريد السائل الى درجة حرارة أقل من درجـة حرارة التـوازن التبريد المفرط (أو فرط التبريد) •

ونود هنا أن ننوه إلى أن كل ماذكرنا آنفـاً عن ظاهرة التبريد والتبلـور والتبريد المفرط ينطبق على ظاهرة التحول المعاكس من الحالة الصلبة الى السائلة• فهذا التحول لايحدث إلا عند درجة حرارة أعلى من T_m وتدعى هذه الظـاهرة 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 النظريةلمعـدن الانتيموان (Sb) تساوي 631 °C ولزمنا حتى يبدأ مصهور الانتيموان النقي بالتبلور أن نبرده حتى درجة الحرارة 590 °C ووجدنا أنه عند هذه الدرجة مـن الحرارة يتبلور المصهور بكامله فان مقدار فرط التبريد يحدد بالفرق :

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

يمكننا تمثيل تبريد المعدن المنصهر وتحوله من الحالة السائلة الى الصلبـة بيانيا من خلال المنحنيات المبينة على الشكل (٤ — ٣) حيثمحاور إحداثياتها

درجة الحرارة ــ الزمن • ومن هــذه المنحنيات نلاحظ أن تبريــد المعدن وهو لايزال في حالته المنصهرة يسبب انخفاضا انسيابيا في منحني التبريد ولايرافق هذا التبريد أي تغير نوعي في حالة المعدن • ولكن عندما نصل بالتبريد إلى درجــة حرارة التبلور تظهر العتبة الافقية على منحني التبريد والتي تعني ثبات درجــة الحرارة عند التبلور وسبب ذلك هو أن الحرارة المنطلقة من المعدن أثناء تبلوره تعوض مايفقده بتبريده خلال هذه الفترة • وبعد أن يتم التحول الكامل إلــى الحالة الصلبة تبدأ الحرارة من جديد بالانخفاض وهذا يعني أن الجسم الصلب أخذ يبرد •

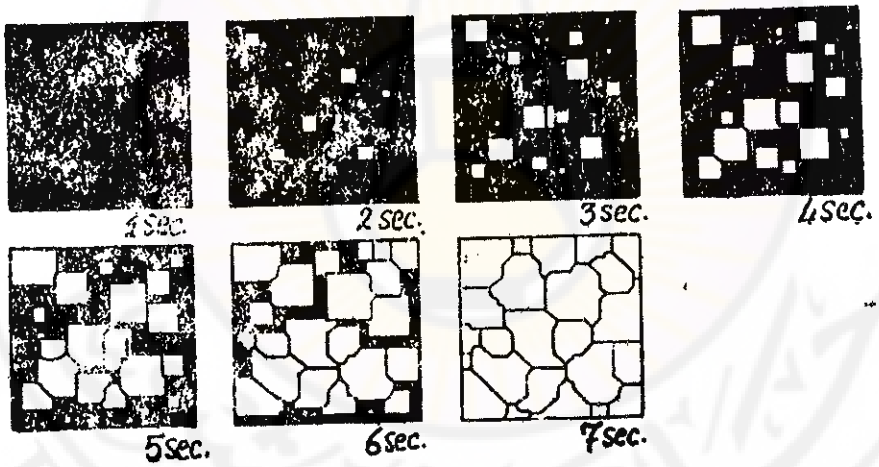
يبين الشكل (٤ ــ ٣ a) منحني التبلور النظري للمعدن ، أما الشكل (٤ ــ ٣ b) فيبين منحني التبلور الحقيقي • ومنه نلاحظ أن المصهور المعدني يبرد باستمرار حتى درجة حرارة التبريد المفرط T_n والتي تقع تحت درجة حرارة التبلور النظرية T_m . إذ عند هذه الدرجة من الحرارة تتوافر القوة المحركــة لعملية التبلور كما ذكرنا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

ونود أن ننوه في نهاية هذا البند إلى أن انطلاق الحرارة أثناء تبلور بعض المعادن يحدث في اللحظة الاولى للتبلور وبشدة مما يسبب ارتفاع درجة الحرارة وبشكل مفاجيء لتقترب من درجة حرارة التبلور النظرية (انظر المنحني c على الشكل ٤ ــ ٣) • فهكذا يتبلور معدن الانتيموان مثلاً ، أما باقي المعادن فان مقدار فرط التبريد عند التبلور يكون صغيرا لدرجة أنه لايمكن تحديده في الشروط العادية للتجربة •

٤ ــ ٢ ــ ميكانيزم التبلــور :

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

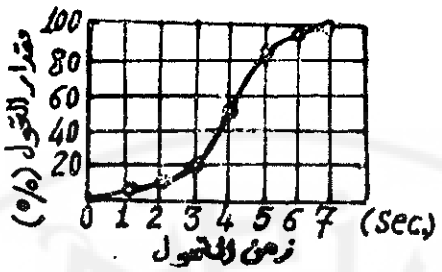
جداً وناعمة تُسمى عادة بذور التبلور (أو مراكز التبلور) ، والثانية هي نمو هذه البذور وتحولها إلى بلورات . ويبين الشكل (٤ ــ ٤) نموذجا مبسطا لعملية تبلور تتم وفق هاتين الظاهرتين . فمن الشكل يتضح أنه افترض على المساحة المبينة تشكل خمس بذور تبلور كل ثانية وان هذه البذور تنمو بسرعة محددة. ففي نهاية الثانية 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 ــ ٤) يمكن أن يتحول إلى مخطط كمي كما في الشكل (٤ ــ ٥) الذي يبين علاقة مقدار التحول (أو



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

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

تسمح دراسة مثل هذه المخططات باستخلاص استنتاجين هامين :



الشكل(٤ ــ ٥) : منحني التبلور الكمي.

١ً ــ إن استمرار عملية التبلور يعني أ نعـدد البلورات المتشكلة يـزداد باستمرار ويستمر بالنمو حتى تأتي اللحظة التي يحدث فيها التقاء البلورات المتنامية مع بعضها ؛ عندها تبدأ هذه البلورات بإعاقة نمـو بعضها لبعضهـا الآخر ويتباطأ بالتالي نموها ، ويساعد على ذلك أن كمية السائل (الذي تتشكل منه بلـورات جديدة) تصبح قليلة .

٢ً ــ تتمتع البلورة المعدنية بشكل منتظم مادامت محاطـة بالسائل ،ولكن عندما يتم التقاء البلورات ببعضها بعضا عندها يتوقف نمو البلورة باتجاه أو أكثر بينما يستمر في الاتجاهات الاخرى ، ولهذا تصبح السطوح الفاصلة بين البلورات ذات أشكال فوضوية غير منتظمة . لذلك فان عملية التبلور تتحـدد بالواحدتين التاليتين :

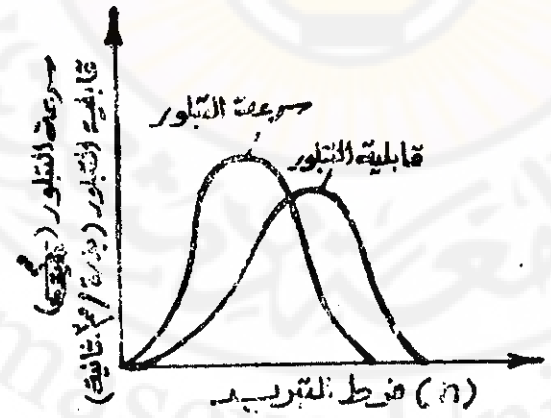
آ ــ سرعة تشكل بذور التبلور وتسمى عادة قابلية التبلور وهي عدد البذور المتشكلة في واحدة الحجم في واحدة الزمن ($\frac{\text{بذرة}}{\text{مم}^3 \cdot \text{ثانية}}$) .

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

لقد تبين أن كلاً من قابليةالتبلور وسرعة التبلور تتعلقان بمقدار فرط التبريد n ، ويبين الشكل (٤ ــ ٦) هذه العلاقة بيانياً • فمن الشكل نلاحظ أنه عندما تكون (n = 0) فان كلاً من قابلية التبلور وسرعة التبلور تساويانالصفر وهذا يعني أن التبلور لن يحدث مما يتفق مع ماذكر آنفا عن ضرورة تحقيق التبريد المفرط لحدوث التبلور • وبازدياد مقدار فرط التبريد تزداد قيم كل من قابلية التبلور وسرعة التبلور ولتصل الى قيمة عظمى ثم تبدأ بالانخفاض لتصلإلى الصفر عندما تكون قيمة فرط التبريد كبيرة جداً •

إن ازدياد كلٍ من قابلية التبلور ، وسرعة التبلور من أجل مقادير فرطتبريد قليلة يعني أنه بالقرب من درجة حرارة التوازن T_m تكون حركة السائل كبيرة والسبب في أن التبلور يتسارع بازدياد مقادير فرط التبريد راجع الى ازدياد الفارق بين قيم القدرة الحرة لكلٍ من السائل والمتجمد •

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



الشكل (٤ ــ 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 وسرعةالتبلور. فعندما تكون قيم سرعة التبلور كبيرة وقابلية التبلور صغيرة (أي عندما تكون مقادير فرط التبريد قليلة ــ انظر الشكل ٤ ــ 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 طبقا للشكل (٤ ــ ٦) فانه إذا أمكن تبريدالسائل إلى درجة حرارة أقل بكثير من درجة حرارة تبلوره فانسرعة التبلور وقابلية التبلور تصبحان مساويتين الصفر وهذا يعني أن السائل لن يتبلور ، وهذا الامر فيمصهور المعادن لايحصل عادة ذلك لان المعادن المصهورة قليلة الميول للتبريد المفرط. أما الأملاح والسيليكات والمواد العضوية فهي على العكس شديدة الميول للتبريد المفرط ، فالزجاج مثلا يسيل للتبريد المفرط ويتواجد في الحالة العجينية ضمن مجال حراري كبير ويتميز بعدم وجود درجة حرارة معينةلتجمده (أو انصهاره) ، وتعد حالته هذه الحالة الامورفية والتي تتميز بعدم وجود توضع منتظم للذرات على شكل هياكل شبكية محددة .

٤ ــ ٣ ــ تشكل بذور التبلور :

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

وفي فترة التحول يكون الطوران (المتحول والناتج) موجودين جنبا إلى جنب والجزيئات الصغيرة التي تنشأ من الطور الجديد المتشكل أسميناها 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) فان فارق القدرة الحرة الذي يساعد على تشكل هذه البذور هو مجموع فوارق القدرة الحرة للتغيرين الداخليين التاليين :

آ – إن تشكل بذرة التبلور يرافقه تغير في القدرة الحرة يتعلق مقداره بحجم هذه البذرة وهذا المقدار سالب ويساوي ($-V\triangle F$) .

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 ($S\sigma$) .

وعليه فان فارق القدرة الحرة الكلي يساوي :

$$\triangle \Phi = S\sigma - V\triangle F \qquad (4.2)$$

حيث : S – مساحة سطح بذرة التبلور .

σ – التوتر السطحي .

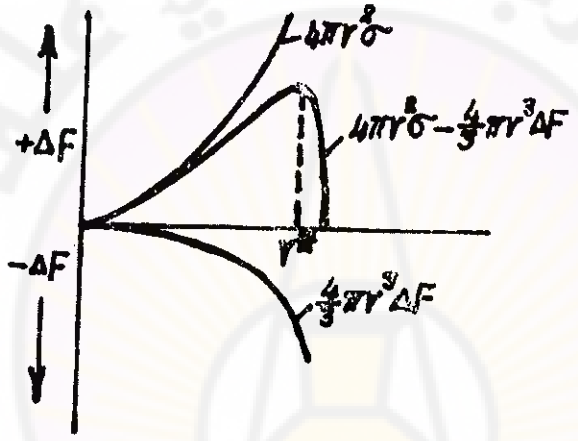
V – حجم بذرة التبلور .

$\triangle F$ – فارق القدرة الحرة في واحدة الحجوم بين الطورين السائل والصلب .

وبافتراض بذرة التبلور على شكل كرة فان العلاقة (4.2) تصبح على الشكل :

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

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



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

ويتضح من الشكل أنه عندما يكون r صغيرا فان تغير القدرة الحرة يكون موجبا وهذا يعيق تشكل طور جديد • أما إذا أصبح r مساويا القيمة الحدية لنصف قطر بذرة التبلور ($r \geqslant r^*$) أو أكبـر منهـا فان القـدرة الحرة تبدأ بالتناقص وتشكل بذرة التبلور يمكن أن يتم • أما قيم r^* فيمكن ايجادها بعد جعل تفاضل العلاقة (4.3) بالنسبة لـ (r) مساويا الصفر •

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

ومنـه :

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

وهكذا فان نمو بذرة التبلور لايبدأ إلا عندما تكون هذه البذرة مستقرة أي عندما يجتمع عدد من الذرات حسب الظروف الجديدة لتكوين بذرة من الطور الب[illegible] قطرها أكبر من r^* أما البذور الاصغر من ذلك فانها لاتلبث أن [illegible] وتذوب في السائل .

نهاية الحديث عن بذور التبلور لابد من التنويه الى مايلي :

أ ـ إن بذور التبلور ثلاثة أنواع هي :

ا ـ بذور ناتجة عن التبريد ولقد تعرفنا على طبيعة تشكل هذا النوع من [illegible] وظروفه بالتفصيل في هذا البند .

ب ـ بقايا الهياكل الشبكية : إذا صهرنا معدنا ما ولم نتمادَ في رفع درجة حرارته أي أبقيناه فوق درجة الانصهار بقليل فان بعض الهياكل البلورية تبقى محافظة على انتظامها أي بدون ذوبان في المحلول وعند التبريد تكون هذه البقايا مراكز تبلور إضافية .

جـ ـ البذور الغريبة : كالشوائب والذرات المعدنية الغريبة التي لاتذوب في المعدن المنصهر والتي تكون عند التبريد مثابة بذور يبدأ حولها التبلور .

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

٣ً ـ لايقتصر تشكل بذور التبلور ونموها على التحول من الحالة السائلة إلى الصلبة فحسب وإنما يتعداها الى التحولات التي تحدث في الحالة الصلبة . فتحول طور صلب الى طور صلب آخر يتم أيضا عن طريق تشكل بذور تبلور

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

٤ ـ ٤ ـ أشكال نمو البلورات :

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

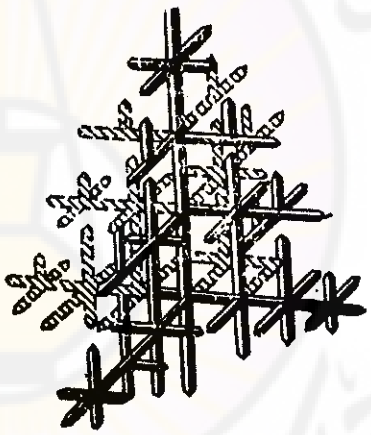
سرعة الحرارة المنطلقة من السائل واتجاهها ، وجود جزيئات لم تذب في السائل تشكل مراكز تبلور إضافية كما ذكرنا سابقاً ، وجود تيارات إعصارية في المصهور المعدني وغيرها .

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

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

٢ً ـ البلورات الغصنية (الدندريتية) : يتم نمو أكثر البلورات المعدنية بهذا الشكل . فلقد تبين لنا آنفا أن نمو البلورة المعدنية في لحظة معينة يختلف

من اتجاه الى آخر داخل السائل ، فمن الملاحظ أن البلورة تبدأ بالنمو عادة على شكل الابرة وحرارة الانصهار المنطلقة من هذه الابرة 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 مناسبةللتجمد أي للترسب على هذه الابرة إلى أجزاء مختلفة من الابرة فتبدأ عندها هذه الإبرة بالتشعب على شكل يشبه ورقة الصنوبر حتى يلتقي بعض هذه الاوراق ببعضها الآخر ويزداد عرض هذه الابر حتى تملأ الفراغ الكائن بينها • ويبين الشكل (٤ — ٨) رسماً تخطيطياً للبلورة الغصنية ، بينما يبين الشكل (٤ — ٩) بلورات غصنية على سطح مصبوبة من الرصاص •



الشكل (٤ — ٨) : نمو البلورة الغصنية



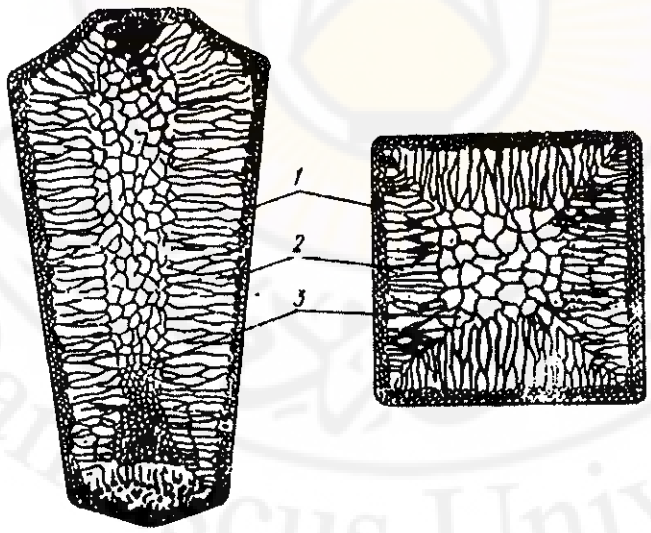
الشكل (٤ — ٩) : بلورات غصنية على سطح مصبوبة من الرصاص

٣ً — 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 ولتكن مصبوبة فولاذية في قالب معدني بغية التعرف عن كثب على طبيعة نمو البلورات وظروفها وأشكالهاوالعوامل المؤثرة في ذلك • فلقد بينا سابقا أن عملية التبلور الحقيقية تخضع بصفة عامة لمجموعة من العوامل • فاذا اجتمعت هذه العوامل الجانبيةمع القوانين العامةللتبلور فانها تحدد بنية المصبوبة • وعلى هذا الاساس تتألف بنية المصبوبة الفولاذية من ثلاث مناطق رئيسة (انظر الشكل ٤ ــ ١٠) :

آ ــ 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،وتأخذظاهرةالتبريد المفرط دورها هنا مما يسبب تشكل عدد كبير جدا من بذور التبلور وبالتالي تكون البنية ناعمة •

ب ــ المنطقة الثانية : وهي بلورات متطاولة • فبعد أن تتشكل القشرة



الشكل (٤ ــ ١٠) : بنية المصبوبة الفولاذية

الخارجية ذات البنية الحبيبية الناعمة تتغير ظروف انطلاق الحرارة من السائل، إذ يبدي جدار القالب مقاومة 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 .

جـ ـ 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 نقاطه تقريبا . ولهذا تنمو البلورات باتجاهات مختلفة حتى يلتقي بعضها ببعضها الاخر ويتشكل نتيجة لذلك بلورات شبه منتظمة نمت بالاتجاهات الثلاثة بشكل متساوٍ تقريبا . أمامراكز التبلور في هذه المنطقة فهي إما دقائق صغيرة موجوده أصلا في الفولاذ السائل أو وقعت فيه بشكل عفوي أو شوائب لم تذب في هذا السائل (أي مركبات صعبة الانصهار).

٤ ـ ٥ ـ التغيرات في الحالة الصلبة (التحولات الالوتروبية) :

يمكن 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 يمكن أن تكون هياكله الشبكية على شكل مكعبات متمركزة حجمياً أو وجهيا وذلك تبعاً لتغير أحد العاملين آنفي الذكر . وكذلك الكوبالت تكون على شكل مكعبات متمركزة وجهيا أو مواشير سداسية. وماقيل ينطبق على كل من القصدير والمنغنيز والتيتانيوم وبعض المعادن الاخرى.

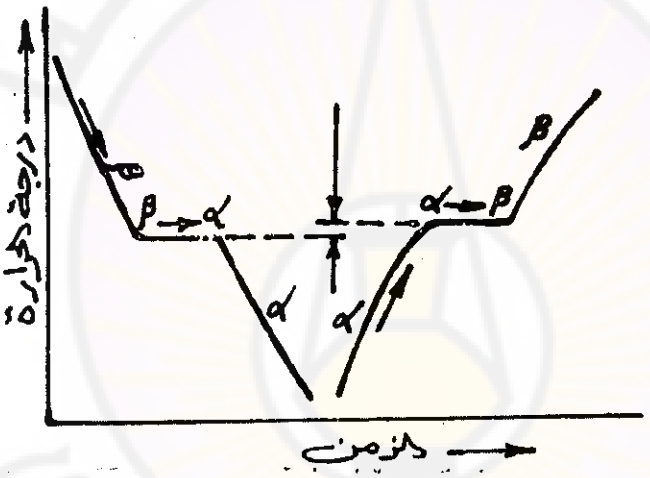
ولقد بحثنا في بداية هذا الفصل والفصل السابق في تعريف ظاهرة التحول

الآلوتروبي وبينا من خلال هذا التعريف أن بعض المعادن عندما تتغير حرارتها وهي في الحالة الصلبة تعيد تباورها 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 يمكن ان يحدث التحول الالوتروبي نفسه في المعدن ، ولكن ذلك يتطلب ضغوطا عالية جدا والتي لايمكن تحقيقها عمليا في أغلب الأحيان ، لهذا يكتفى عادةً بدراسة التحول الآلوتروبي الحراري .

يبين الجدول (٤ ــ 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 . ويترافق 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 منحني التسخين (أي المنحني الذي يبين علاقة درجة الحرارة بزمن التسخين ــ انظر الشكل ٤ ــ 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 للتحـــول الآلوتروبي ، هما 911°C و 1392°C . وتتشكل الاشكال الآلوتروبية الجديدة نتيجة ظهور مراكز تبلور ونمو هذه المراكزوتحولها إلى بلورات مثلها في ذلك مثل التبلور من الحالة السائلة ، وتتمتع المنحنيات التي تربط مابين كل من قابلية التبلور وسرعة التبلور في هذه الحالة أيضا ومقدار فرط التبريد للتحول الآلوتروبي بالشكل نفسه الذي رأيناه للتبلور من المحلول السائل. ونود هنا أن ننوه إلى أن التحولات الآلوتروبية في الحالة الصلبـــة تتمتع بميل كبير لفرط التبريد وأكثر منه في حالة التحول من سائل إلى صلب .



الشكل (٤ ـ ١١) : منحنيات التـــريد والتسخين لمعدن يتمتـــع بتحـــول آلوتروبي .

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

آ ـ يُسمى القصدير الذي درجة حرارته أعلى من 18°C القصدير الابيض والقصدير الذي درجة حرارته أقل من هذه الدرجة القصدير الرمادي . ويكـــون

الجدول (٤ ــ ١) : المجالات الحرارية التي تتواجد فيها الاشكال الآلوتروبية لبعض المعادن

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

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

* – مكعب متمركز وجهيا تتوضع فيه أربع ذرات إضافية بحيث تشكل كل أربع ذرات متجاورة هرماً ثلاثياً .

الهيكل الشبكي للقصدير الابيض على شكل رباعي رقم احداثياته (6) ، ويتحول هذا الرباعي تحت الدرجة 18 °C الى هرم ثلاثي كما في الماس رقم إحداثياته (4) ، ونسبة ملء الفراغ في الاول أكثر بمرة ونصف المرة منها في الثاني . ويترافق تحول القصدير الابيض الى رمادي بازدياد في الحجم يصل تقريبا الى ٢٥٪ . والقصدير الرمادي مسحوق رمادي لا يتمتع بالخواص المعدنية المعروفة. وعلى الرغم من أن درجة حرارة التحول الآلوتروبي من $Sn_{(\beta)}$ الى $Sn_{(\alpha)}$ هي 18 °C ، إلا أن هذا التحول عند هذه الدرجة من الحرارة (وحتى أقل من ذلك) يتم بسرعة بطيئة جدا ، ونحصل على قيم كبيرة نسبيا لسرعة نمو البلورات (أي سرعة إعادة التبلور) عندما يكون مقدار فرط التبريد مساويا 50 °C أي أن التحول يتم عند درجة الحرارة (32 °C –) فعند هذه الدرجة من الحرارة تكون سرعة نمو البلورات مساوية ٠٠٤ر٠ مم في الساعة . ونظرا لأن سرعة تحول القصدير $Sn_{(\beta)}$ بطيئة جدا فانه يميل بشكل كبير الى التبريد المفرط ويمكن أن يحافظ على هياكله الشبكية دون تحول الى $Sn_{(\alpha)}$ لفترة زمنية طويلة نسبيا عند درجات الحرارة التي أقل من 18 °C .

ب – بينا آنفاً أن معدن الحديد عند درجات الحرارة التي تقل عن 911 °C يكون على شكل مكعبات متمركزة وسطيا ، وعند تسخينه الى درجة الحرارة 911 °C يتحول الى مكعب متمركز وجهياً Fe_{γ} والذي لا يلبث عند درجة الحرارة 1392 °C أن يتحول الى مكعبات متمركزة حجمياً مرة أخرى Fe_{α} (انظر الشكل ٣ – ١٢ في الفصل الثالث) . ولهذا نرى أن المكعب المتمركز حجمياً للحديد مستقر في مجالين حراريين . ويترافق التحول من $\gamma \leftarrow \alpha$ بانخفاض في رقم الاحداثيات وانخفاض أيضا في نسبة ملء الفراغ (البند ١ – ٥ من الفصل الاول) . ولو لم

يترافق انخفاض نسبة ملء الفراغ بنقصان نصف قطر الذرة لحصل ازدياد في حجم الهيكل الشبكي عند التحول من γ الى α بمقدار 9% ؛ لذا ونظراً لنقصان نصف قطر الذرة فان 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 فان لها أهمية بالغة •

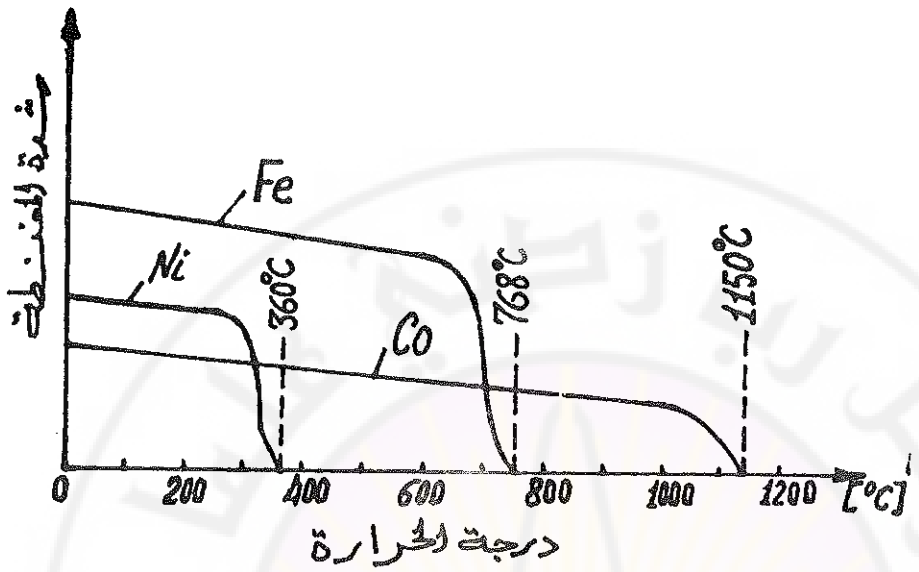
٤ ــ ٦ ــ التغيرات المغناطيسية :

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

يتمتع التغير المغناطيسي بمجموعة من الخواص تميزه عن التغيرات الآلوتوربية نوردها فيما يلي :

١ً ــ تتغير الخواص الفيرومغناطيسية بالتدريج 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 •

٢ً ــ لا يتمتع التغير المغناطيسي بتخلف حراري ولا يؤدي ازدياد سرعة التبريد للمعدن الى انخفاض درجة الحرارة التي يحدث عندها التغير •



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

٣ً ــ 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 .

٤ً ــ إن أهم ما يميز التغير المغناطيسي عن التغير الآلوتروبي هو أن الاول 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 تغييراً في طبيعة الارتباط المتبادل بين الأغلفة الالكترونية الداخلية والخارجية للذرات .

* * *

الفصل الخامس

بنية الخلائط المعدنية

لا تستعمل المعادن بشكل نقي إلا في حالات خاصة وذلك عندما تكون هناك حاجة الى إحدى الخواص التي يتمتع بها المعدن النقي كناقلية النحاس الكهربـاء ومقاومة الرصاص الكيميائية ... الخ ، لذلك غالبا ما تستعمل بدلاً من المعادن الصافية خلائط هذه المعادن مع معادن أو غير معدنية أخرى . وتُعرَّف الخليطـة 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 أعقـد من بنيـة المعدن الصافي ، وتتعلق هذه البنية بشكل رئيس بنوع الارتباطات التي تحصل عادةً بين العناصر المشكلة الخليطة ، إذ يمكن أن تكون بنية الخليطة مزيجاً ميكانيكياً لبلورات مستقلة من كلا العنصرين ويمكن لعناصر الخليطة أن تتحد كيميائياً مع بعضها مشكلةً مركبات كيميائيـة ويمكن أن يذوب بعضها في الآخر في الحالة الصلبة مشكلة محاليل معدنية صلبـة كما يمكن أن تتشكل بعض الاطوار التي يصعب نسبها الى أيٍ مـن المركبـات والمحاليل آنفة الذكر وتتمتع بخواص وسطى (أي أن يجمع الطور المتشكل مابين خواص المركب الكيميائي والمحلول المعدني الصلب مثلاً) .

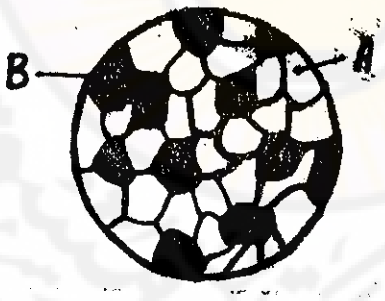
وسوف نقوم في هذا الفصل بدراسة التفاعلات التي يمكن أن تحدث بـين مكونات الخلائط المعدنية وما ينتج عنها من أطوار وعناصر بنية .

٥ ــ ١ ــ 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 . وطبقا لهذه الشروط تكون الخليطة مؤلفة من بلورات مستقلة لكلٍ من A و B (انظر الشكل ٥ ــ ١).

وتظهر استقلالية بلورات العنصرين A و B بشكل واضح على البنية المجهرية عندما تكون هذه البلورات كبيرة الحجم نسبيا . وتبيّن دراسة البنية الداخلية للخليطة بالاشعة 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 مكانا وسطيا بين قيم الخواص لكل من العنصرين .



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

٥ ــ ٢ ــ المركب الكيميائي :

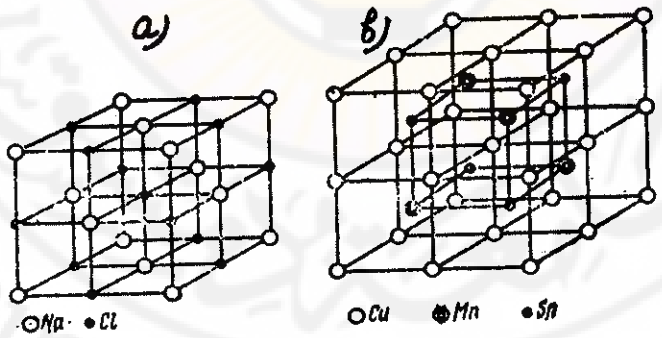
إن ما يلاحظ عند تشكل المركب الكيميائي هو مايلي :

آ ــ 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 ــ يأخذ شكل الهيكل الشبكي للمركب الكيميائي شكلاً خاصاً بحيث تكون ذرات العناصر المشاركة في بناء هذا الهيكل مرتبة ترتيبا هندسيا منتظما •

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

المركب الكيميائي الاول هو Na Cl حيث نلاحظ من الشكل (٥ ــ ٢ a) أن شوارد الصوديوم تشكل هيكلا شبكيا على شكل مكعب متمركز وجهيا وتشكل شوارد الكلور هيكلا شبكيا مشابها للاول ولكنه ينزلق بمقدار نصف 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 فان الصيغة الكيميائية للمركب هي AB ، أما اذا كان عدد ذرات العنصر A



الشكل (٥ ــ ٢) : (a ــ الهيكل الشبكي للمركب Na Cl •
(b ــ الهيكل الشبكي للمركب Cu_2 Mn Sn •

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

نحن نعلم أنه عندما يتشكل مركب كيميائي من تفاعل معدن مع عنصر غير معدني فان الرابطة الموجودة هي رابطة شاردية حيث تعطي ذرة المعدن الكترونات التكافؤ متحولةً الى شاردة موجبة بينما تأخذ ذرة العنصر غير المعدني هذه الالكترونات متحولةً الى 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 لتشكل 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 الالكتروني والرابطة الموجودة هنا هي رابطة معدنية ، وهذه الرابطة أضعف من الرابطة الشاردية ، إذ يمكن في ظروف معينة أن تتغير نسبة أيٍ من العناصر المشاركة في هذه الرابطة • ولهذا السبب فان 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 الى أنه بإمعان النظر في الهيكل الشبكي الموجود على الشكل (٥ — ٢ b) 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 وجوه الهيكل حيث يتبع لهذا الهيكل $\frac{1}{2}$ هذه الذرات ، ١٢ ذرة من معدن النحاس أيضا متوضعة في منتصفات حروف الهيكل حيث يتبع $\frac{1}{4}$ هذه الذرات للهيكل ، ذرة واحدة من

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

٨ ذرات من معدن النحاس (إذا أخذنا بعين الاعتبار ماذكر آنفا) •

٤ ذرات من معدن المنغنيز و ٤ ذرات من معدن القصدير ذلـك لأن ذرات هذين المعدنين تقع بكاملها داخل الهيكل الشبكي وتتبع له •

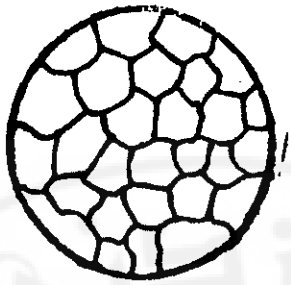
وعلى هذا الاساس فان صيغة هذا المركب هـي : إما $Cu_8 Mn_4 Sn_4$ أو $Cu_2 Mn Sn$ كما أسلفنا •

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

٥ ــ ٣ ــ محلول معدني صلب قاعدته احد عناصر الخليطة :

تكوّن 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 الذوبـان التي كانت موجودة في الحالة السائلة • ويُسمى الطور الصلب المتشكل نتيجـة تبلور هذا النوع من الخلائط المحلول المعدني الصلب •

يُبيِّن التحليل الكيميائي والطيفي للمحاليل المعـدنية الصلبة أن المحلـول المعدني الصلب يمكن أن يحتوي على عنصرين أو أكثر ، بينما تُبيِّن دراسة البنية المجهرية أن بنيته هي بلورات متجانسة كما في المعدن النقي (انظر الشكل ٥ــ٣)، وبينما تُبيِّن الدراسة بالأشعة السينية أن هناك شكلا واحدا فقط للهياكل الشبكية



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

في المحلول المعدني الصلب (كما في المعدن النقي) .

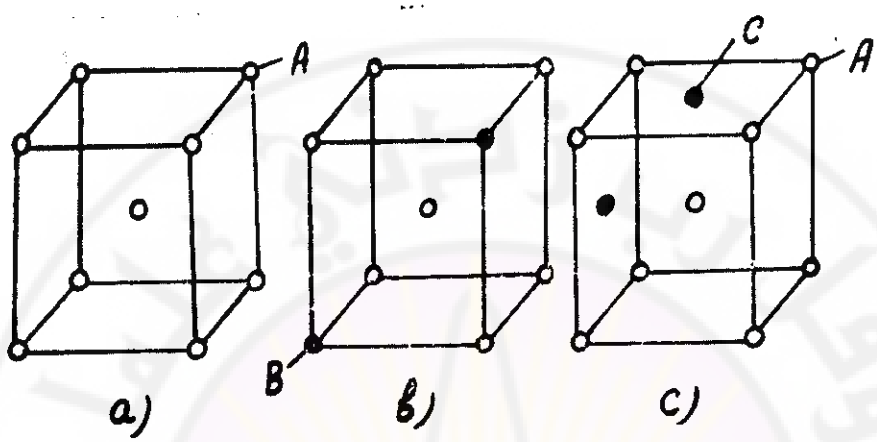
لهذا وخلافا للمزيج الميكانيكي فان المحلول الصلب هو طور وحيد ويتألف من نوعٍ واحدٍ من البلورات ويتمتع بنموذج واحد لهياكله الشبكية ، وخلافاً للمركب الكيميائي فان المحلول الصلب لا يتواجد فقط من أجل نسبة مشاركة محددة وثابتة لعناصر الخليطة وإنما يتواجد في مجال تركيز معين (أي تتغير نسب العناصر المشاركة في مجال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

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

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

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

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

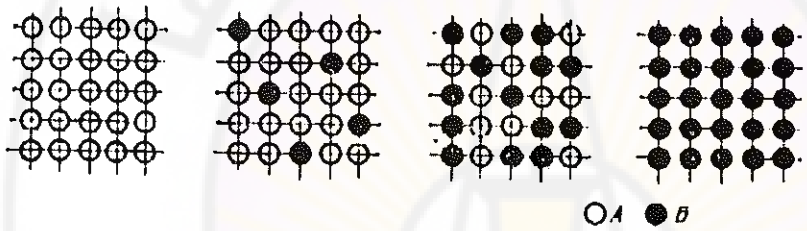


الشكل (٥ ـ ٤)

a) هيكل شبكي على شكل مكعب متمركز حجمياً 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 . فاذا كانت ذرة العنصر المذاب أكبر من ذرة العنصر المذيب فان الهيكل الشبكي يكبر حجمه ، وإذا كانت أصغر فانه يتقلص . أما في المحاليل الصلبة التداخلية فان أطوال أضلاع الهياكل الشبكية تزداد في جميع الحالات ذلك لأن أقطار ذرات العنصر المذاب تكون دائما 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 فان ازدياد تركيز المعدن B في المحلول الصلب التبادلي (الذي قاعدته المعدن A) سوف يؤدي باستمرار الى ازدياد ذرات المعدن B التي تحل محل ذرات المعدن A وهكذا حتى نصل لمرحلة تكون جميع ذرات المعدن A قد استبدلت بها ذرات المعدن B ـ أي وكأننا قد حولنا الهيكل الشبكي للمعدن A بالتدريج الى هيكل شبكي للمعدن B (انظر الشكل ٥ ـ ٥) • إن هذا



الشكل ٥ ـ ٥ : الهياكل الشبكية للمحلول المعدني الصلب عندما يكون الذوبان تبادليا وغير محدود •

يمكن أن يحدث اذا كان لكل من المعدنين الهيكل الشبكي نفسه •

من هنا نستنتج أن الشرط الاول لتشكل محاليل صلبة يكون الذوبان فيها مطلقا هو تشابه الهياكل الشبكية لكلا العنصرين (المذيب والمذاب) •

أما الشرط الثاني لتشكل محاليل صلبة يكون الذوبان فيها مطلقا فهو أن يكون الفارق صغيرا بين أقطار ذرات العنصرين (المذيب والمذاب)• فاذا تشابهت الهياكل الشبكية لكلا العنصرين واختلفت أقطار ذراتهما بشكل كبير فان تشكل محلول صلب منهما سيؤدي الى تشوه هيكل العنصر الاساسي بشكل كبير ، وعندما يصل تشوه الهيكل الى 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 لتشكل 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 آنفة الذكر ضروريا حتى يكون الذوبان مطلقا في الحالة الصلبة ولكنه في بعض الاحيان ليس كافيا . فمثلاً الخليطه 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 الم يحقق عنصرا الخليطة جميع الشروط الثلاثة فان 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 ـ ٤ ـ محلول معدني صلب قاعدته مركب كيميائي :

تعرفنا آنفا على المحلول المعدني الصلب الذي يكون فيه أحد عناصر الخليطة هو العنصر الاساسي (المذيب) وبيّنا 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) فانها 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 ــ ٢ b) كيف يكون الهيكل الشبكي للمركب الكيميائي الذي اتحدت فيه ثلاثة معادن هي : النحاس والمنغنيز والقصدير • فاذا فرضنا أن الرابطة الموجودة هنا هي الرابطة المعدنية بحيث يعطي كل معدن الكترونات من المدار الخارجي للذرة ولتشكل جميع هذه الالكترونات الغاز الالكتروني كما نعلم • وإذا كان محتوى النحاس في الخليطة يفوق كمية النحاس اللازمة لتشكل المركب الكيميائي وفق النسبة العددية المطلوبة وحصل أن حلت ذرة من النحاس (نظرا لكميته الزائدة) محل ذرة من المنغنيز فان 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 •

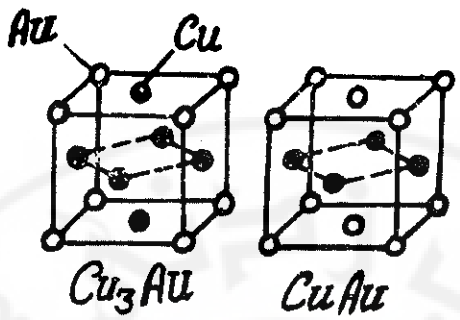
بيّنا آنفاً أنه يمكن لذرات غريبة (غير الذرات الداخلة في تركيب المركب الكيميائي) أن تحل محل بعض ذرات المركب الاساسية وعندها (وكما نعلم) نحصل على محلول معدني صلب قاعدته المركب الكيميائي أيضا ، وتستخدم في الوقت الحاضر صيغ كيميائية معينة للدلالة على هذه الانواع من المحاليل المعدنية الصلبة • فمثلاً يتسع بروم الحديد Fe_4B_2 (كمركب 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 فان النسبة بين ذرات المعدن وذرات العنصر الاخر في المركب تبقى محافظة على قيمتها وبمعنى آخر يمكن كتابة النسبة على الشكل $(Fe + Cr)\ (B + C) = 4/2$ ، ولهذا فان صيغة المحلول المعدني الصلب قاعدته المركب الكيميائي Fe_4B_2 هي الصيغة التالية : $(Fe, Cr)_4\ (B, C)_2$ •

٥ ــ ٥ ــ المحلول 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 تبيَّن 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 للسحاليل الصلبة المتشكلة في هذه الخلائط .

من المعروف أن ذرات العنصر المذاب تتوزع بدون انتظام في الهياكل الشبكية للعنصر المذيب وذلك عندما يكون المحلول الصلب عاديا . ولكن من أجل ظروف معينة فان الذرات تحتل أمكنة 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 كلٌ من عنصري الخليطة بنفس الهيكل الشبكي ويذوب هذان المعدنان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة الصلبة . وينعدم في المحلول الصلب العادي للنحاس والذهب وجود القاعدة الدقيقة والثابتة في توضع ذرات كلٍ من هذين المعدنين في عقد المكعب المتمركز وجهاً ، 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) فان ذرات النحاس والذهب تحتل أماكن محددة في الهيكل الشبكي (انظر الشكل ٥ ــ ٦) .



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

فمن هذا الشكل نلاحظ أنه إذا احتلت ذرات الذهب كل العقد الزاوية في المكعب المتمركز وجهياً وذرات النحاس مراكز الوجوه فان النسبة بين ذرات النحاس والذهب تكون (٣ الى ١) ويمكننا التعبير عن هذا الطور بالصيغة الكيميائية التالية Cu_3Au . وإذا لم تشغل ذرات النحاس سوى مراكز أربعة وجوه من وجوه المكعب وما تبقى من عقد الهيكل شغلتها ذرات الذهب فان 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 ــ أي أن التحول من هيكل غير منتظم الى هيكل منتظم يترافق بانتقال الذرات من عقدةٍ الى أخرى ، ولهذا يعتبر التبريد البطيء أحد العوامل الهامة للحصول على محاليل صلبة منتظمة .

٥ ـ ٦ ـ 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 (الكترونات التكافؤ) في المركب وعدد ذرات المعدنين المشكلين لهذا المركب بحيث يكون : $\frac{\text{عدد الالكترونات}}{\text{عدد الذرات}} = \frac{٣}{٢}$ ، $\frac{٧}{٤} \cdot \frac{١٣}{٨} \cdot$

ولكل نسبة من النسب الآنفة الذكر هيكل شبكي يختلف عن الهيكل الموافق للنسبة الأخرى . فمثلاً عندما تكون النسبة ($\frac{٣}{٢}$) فان الهيكل الشبكي المتشكل هو مكعب متمركز حجمياً (ويدعى بالطور β) ، وإذا كانت النسبة ($\frac{١٣}{٢١}$) فان الهيكل هو مكعب من النوع المعقد والمحتوي على ٥٢ ذرة من كلا المعدنين (ويدعى بالطور γ) ، وأما للنسبة ($\frac{٧}{٤}$) فالهيكل عبارة عن موشور سداسي (ويدعى بالطور ε) .

تصادف المركبات الالكترونية عادةً في الخلائط المعدنية التي تتمتع بأهمية صناعية كبيرة مثل : خليطة النحاس ـ التوتياء ، النحاس ـ القصدير ، الحديد ـ

الألمنيوم، الحديد ـ السيليسيوم..الخ. وغالباً ما نصادف في نفس المجموعة الأطوار الثلاثة β و γ و ε . فمثلاً في مجموعة النحاس ـ التوتياء يكون الطور β عبارة عن المركب $CuZn$ والطور γ عبارة عن المركب Cu_5Zn_8 والطور ε عبارة عن المركب $CuZn_4$.

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

ويبيّن الجدول (٥ ـ ١) المركبات الالكترونية التي يمكن أن نصادفها في خلائط النحاس الصناعية .

٥ ـ ٧ ـ المركبات الكيميائية المعقدة :

تتشكل 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 سابقا) . ولكن هناك بعض المركبات الكيميائية التي يكون التباين فيها بين أقطار الذرات المتحدة ليس كبيرا وإنما وسطيا ، حيث تكون النسبة بين قطر ذرة أحد المعدنين وقطر ذرة المعدن الآخر في حدود (١ر٢ : ١) وصيغة المركب الكيميائي المتشكل تكون على الشكل AB_2 . ونورد فيما يلي بعضا من أنواع هذه المركبات

الجدول (٥ ــ ١) : المركبات الالكترونية في خلائط النحاس الصناعية

نوع الطور	عدد الالكترونات / عدد الذرات	نوع الهيكل الشبكي	المركبات الالكترونية لمجموعات مختلفة			
			Cu-Zn	Cu-Sn	Cu-Al	Cu-Si
β	$\frac{٣}{٢}$	مكعب متمركز حجمياً	Cu Zn	Cu_5 Sn	Cu_3 Al	Cu_5 Si
γ	$\frac{٢١}{١٣}$	مكعب من النوع المعقد	$Cu_5 Zn_8$	$Cu_{31} Sn_8$	$Cu_9 Al_4$	$Cu_{31} Si_8$
ε	$\frac{٧}{٤}$	موشور سداسي	$Cu Zn_3$		$Cu_5 Al_3$	Cu_3 Si

ونوع هياكلها الشبكية :

١ً ــ المركبات : $Mg\,Cu$ ، $Ti\,Cr_2$ ، $Zr\,Mo_2$ وغيرها . وتتبلور هــذه المركبات على شكل مكعبات معقدة .

٢ً ــ المركبات : $Mg\,Zn_2$ ، $Fe\,Be_2$ ، $W\,Fe_2$ ، $Mo\,Fe_2$ وغيرها . وتتبلور على شكل مواشير سداسية معقدة .

٣ً ــ المركبات : $Mg\,Ni_2$ ، $Zr\,Fe_2$ ، $Ti\,Co_2$ وغيرها . وتتبلور 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 لهــذه الخلائط .

٥ ــ ٨ ــ المركبات التداخلية (الاطوار التداخلية) :

تتشكل الاطوار التداخلية من ذرات المعادن والعناصر غير المعدنية بحيث تكون أنصاف أقطار ذرات هذه العناصر صغيرة جدا (مثل : الهيدروجين $r_H = 0{,}46\ A^\circ$ والنيتروجين $r_N = 0{,}71\ A^\circ$ والكربون $r_C = 0{,}77\ A^\circ$) . وتتشكل 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 المعــدن الهيكل الشبكي والذي يكون عادة من النوع البسيط (مكعبا متمركزا حجميا أو وجهيا أو موشورا سداسيا مزدحما بالذرات) بينما تدخل ذرات العنصر الآخر في الاماكن الخالية بين ذرات المعدن ، وهذا أهم مايميز 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 : MX_2 ، MX ، M_2X ، M_4X (حيث : M ـ رمز المعدن ، X ـ رمز غير المعدن) ؛ ولهذا يمكن أن تنسب هذه الاطوار 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 :

آ ـ لا تتمتع الاطوار التداخلية عادة بنسبة عددية محددة للذرات تتشكل على أساسها هذه الاطوار .

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

جـ ـ عدم كفاية ذرات اللامعدن لتشغل جميع الاماكن الخالية في الهيكل الشبكي في أغلب الاحيان .

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

٥ ـ ٩ ـ قاعدة الطور :

بيّنا 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) بطيئين جداً جداً .

ويُعبر 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 وكمية كلٍ 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 مفاجيء اما التركيب الكيميائي أو البنية أو كلاهما معاً . من هنا نستنتج أن السائل المتجانس هو مجموعة أحادية الطور بينما المزيج الميكانيكي لنوعين من البلورات فهو مجموعة ثنائية الطور ذلك لأن البلورة الواحدة تختلف عن جارتها بالتركيب ويفصلهما عن بعضهما سطوحهما الخاصة .

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

واما 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 الصفر فان هذا يعني أن أي تغيير في أيٍ من العوامل الداخلية أو الخارجية يمكن أن يؤدي الى تغيير في عدد الأطوار . وإذا كان عدد درجات الحرية مساوياً الواحد فان هذا يعني أنه يمكن أن يحدث تغييراً في واحدٍ فقط من العوامل آنفة الذكر دون أن تسبب تغييراً (زيادة أو نقصاناً) في عدد الأطوار .

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

$$n + F = m + 2 \qquad (5.1)$$

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 ، فان المعادلة (5.1) تصبح على الشكل :

$$n + F = m + 1 \qquad (5.2)$$

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 فان : $n = 1$ أي أن المجموعة مؤلفة من طور واحد هو السائل ؛ ولهذا فان عدد درجات الحرية في هذه الحالة يساوي الواحد وذلك من المعادلة :

$$F = m - n + 1 = 1 - 1 + 1 = 1 \qquad (5.3)$$

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

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

$$F = m - n + 1 = 1 - 2 + 1 = 0 \qquad (5.4)$$

وهذا يعني أن عدد درجات الحرية أصبح مساوياً الصفر 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 نهائيا من مجموعة التوازن .

الفصل السادس

مخططات توازن الخلائط المعدنية

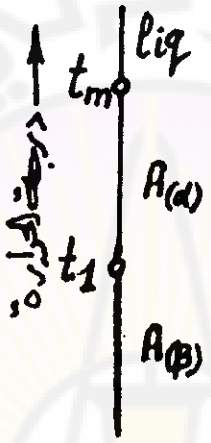
تُسمى الخليطة عادةً حسب عدد مكوناتها خليطة ثنائية (من مكونين) او ثلاثية (من ثلاثة مكونات) ... الخ . وسنقتصر في دراستنا على مخططات توازن الخلائط الثنائية ـ أي المكونة من مكونين (معدنين) فقط .

وتتم دراسة الخلائط المعدنية ورسم مخططات توازنها تجريبيا ، 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 للتحول 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 . فاذا كان التبريد سريعا والوقت الذي نعطيه للتغير أقل من الوقت اللازم فان هذا التغير سوف يتأخر عن الحدوث وقد لا يحدث أبداً .

٦ ـ ١ ـ ملاحظات عامة حول إنشاء مخطط التوازن :

يُعرَّف مخطط التوازن على أنه المخطط الذي يُبيِّن كيف تتغير حالة الخليطة عندما يتغير كلٌ من تركيزها ودرجة حرارتها .

فاذا كانت المجموعة مؤلفة من مكونٍ واحد فان مخطط التوازن يتمتع بمحورٍ واحدٍ فقط هو محور درجة الحرارة • ولهذا فان النقاط التي تظهر على هذا المحور تدل على درجات الحرارة التي يحدث عندها أي تحول ممكن في حالة هذا المكون (تحول طوري أو آلوتروبي — انظر الشكل ٦—١)• أما إذا كانت المجموعة مؤلفة

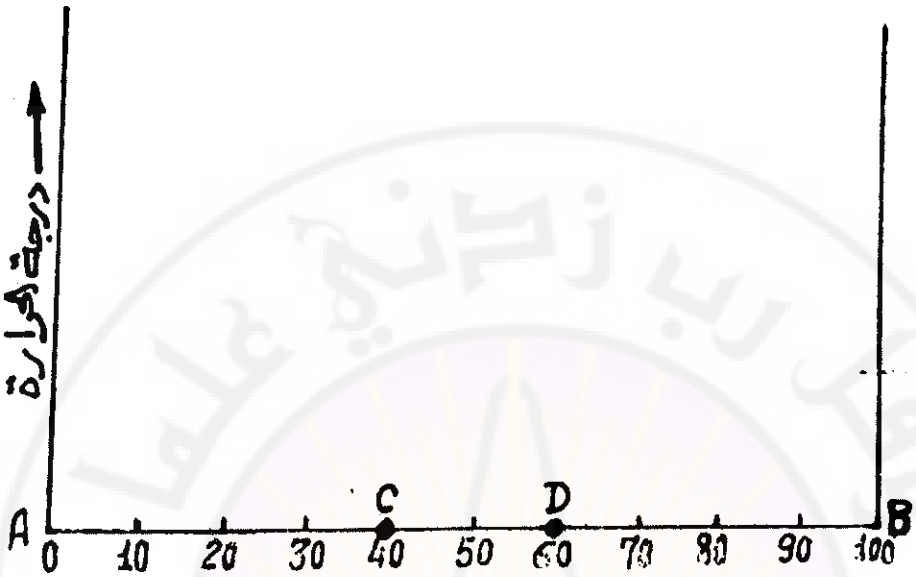


الشكل (٦ — ١) : تغير حالة المجموعة المؤلفة من مكون واحد بتغير درجة الحرارة.

من مكونين فان مخطط التوازن يتمتع بمحورين : 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 تُبيِّن النقطة C على محور التركيز أن نسبة المعدن B في الخليطة تساوي 40% ، والمعدن A 60% ، بينما تُبيِّن 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 فان النقاط الحدودية على



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

المخطط موافق المعادن النقية ، ومابين هذه النقاط يُبيِّن خلائط ثنائيـة من كـلا المعدنين بنسب مختلفة .

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

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

٦ ــ ٢ ــ كيفية إنشاء مخطط التوازن تجريبياً :

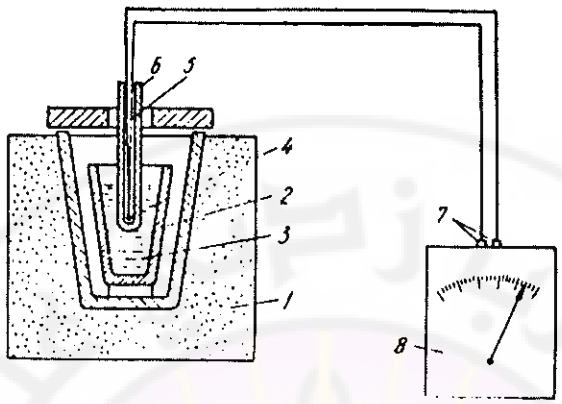
يستخدم لإنشاء مخطط التوازن عادةً مايُسمى طريقة التحليل الحراري ، أي

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 والانفصالات 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 تُربط النهايتان الحرتان لهذين السلكين مع مقياس ميللي فولت • فاذا سُخّنت النهاية الملحومة للمزدوجة الحرارية فان تياراً كهربائياً سوف يسري في المزدوجة الحرارية ومنها إلى مقياس الميللي فولت • وتزداد شدة هذا التيار بازدياد درجة حرارة النهاية الملحومة للمزدوجة • ويتم عادةً في البداية معايرة المجموعة المؤلفة من المزدوجة الحرارية ومقياس الميللي فولت وذلك قبل استعمالها في قياس درجات الحرارة • ويُبيِّن الشكل (٦ ــ 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 أدق لا بد من استخدام المجاهر الضوئية وأشعة ﺱ وذلك بغية دراسة التحولات والانفصالات التي تطرأ عادةً على الخليطة أثناء تبريدها ، ذلك لأن طريقة التحليل الحراري آنفة الذكر لا تفي بالغرض في أغلب الأحيان •

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



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

1 – فرن . 2 – بوتقة . 3 – المعدن المصهور .
4 – النهاية الملحومة للمزدوجة الحرارية . 5 – المزدوجة الحرارية .
6 – انبوب من الكوارتز لحماية المزدوجة الحرارية .
7 – نهايتا السلكين المربوطان مع مقياس الميللي فولت .
8 – مقياس الميللي فولت .

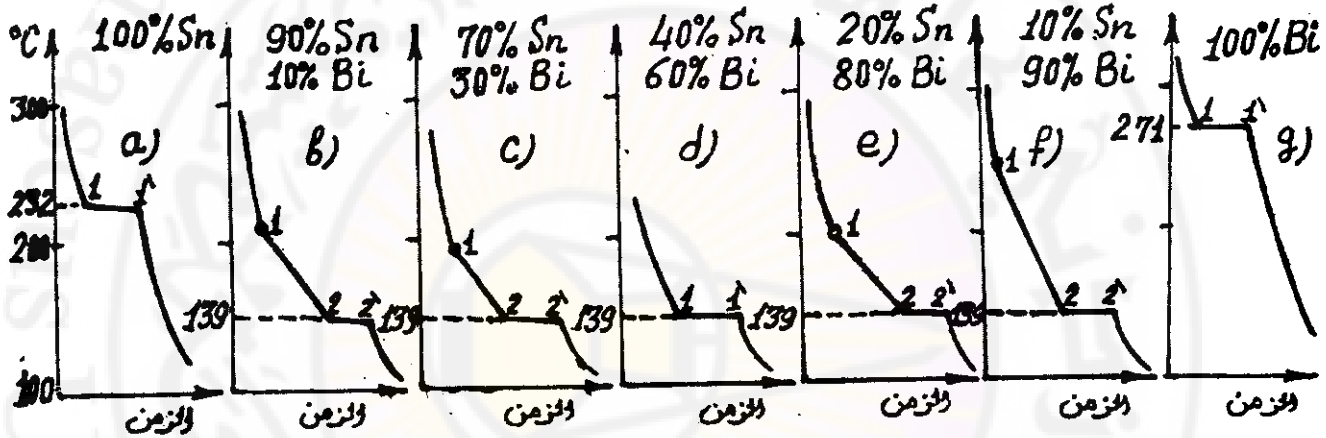
عن كيفية إنشاء مخطط التوازن لمجموعة مؤلفة من معدنين :

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 يمثل هذه المجموعة هو إما خلائط القصدير والبزموت أو خلائط الرصاص والأنتيموان وغيرها كثير نعتمد المجموعة الأولى (أي مجموعة القصدير والبزموت) هي موضوع دراستنا هذه ، لهذا نأخذ عدة عينات من خلائط هذين المعدنين وبنسب 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 ٦ــ٤)• إذ يُبيِّن المنحني المبيَّن على الشكل (٦ ــ ٤ a) كيف يبرد القصدير النقي من درجة الحرارة التي أعلى من درجة حرارة الإنصهار مروراً بمرحلةالتباور عند درجةالحرارة 232 °C ، بينما يُبيِّن كل" من المنحنيين (٦ ــ ٤ b و ٦ ــ 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 درجتي حرارة مختلفتين ، إذ نلاحظ 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 139 °C ، حيث تصبح نسبة القصدير 40% ، عندها تبلغ نسبة البزموت 60% ، ومن أجل هذه النسب بالذات يصبح المصهور المتبقي مشبعاً بكلا المعدنين ، لهذا يتجمد هذا المصهور دفعةً واحدة وعند درجة حرارة ثابتة (139 °C) 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 ــ ٤ d) ، ومايحدث هو أن المصهور يتحول مباشرة عند درجة الحرارة 139 °C الى مزيج من بلورات القصدير والبزموت النقية •

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

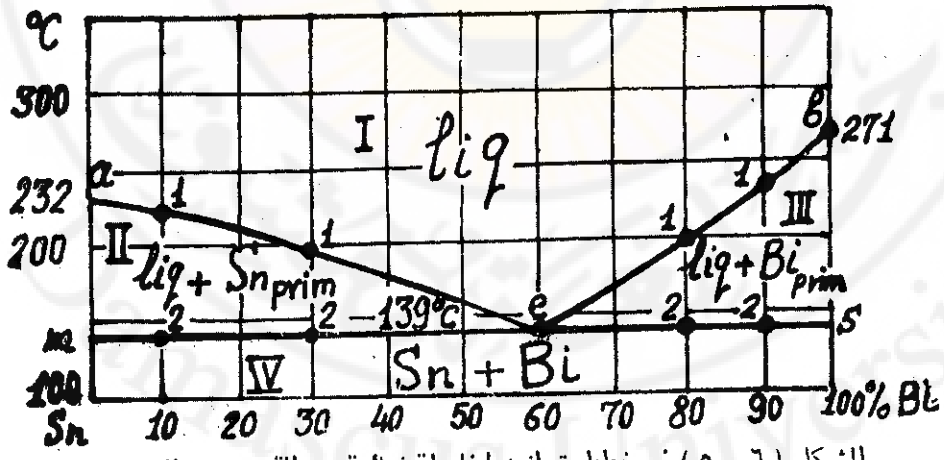


الشكل (٦ ــ ٤) : منحنيات تبريد لخلائط ثنائية من القصدير والبزموت مختلفة النسب .

معطياً مزيجاً من بلورات نقيـة لكلا المعدنين (انظر الاشكال ٦ ــ ٤ e و٦ــ٤ f) • ونلاحظ أنه كلما ازدادت نسبة البزموت في الخليطـة الثنائيـة المختبرة ارتفعت درجة حرارة بدء انفصال بلورات البزموت الاولية على منحني التبريد • أما المنحني المبيَّن على الشكل (٦ ــ ٤ g) فهو منحني تبريد معدن البزموت النقـي •

تسمى النقطة 1 على منحنيات التبريد آنفة الذكر نقطة السيولة ، بينمـا تسمى النقطة 2 نقطة التجمد •

وهكذا وبحصولنا على عددٍ كافٍ من منحنيات التبريد نستطيع أن نرسـم مخطط التوازن لهذه الخليطة الثنائية وذلك بجمع هذه المنحنيات في مخططٍ واحد هو مخطط التوازن والذي تكون محاوره الإحداثية كما بيناها على الشكل (٦ــ٢)• فاذا أخذنا كل منحني من منحنيات التبريد هذه وحملناه عـلى مخطط التـوازن وذلك بعد تدوير المنحني بزاوية 90° (أي افترضنا محور الزمن عمودياً عـلى مستوي المخطط) حصلنا على مجموعة نقـاط عـلى مخطط التـوازن • فـاذا وصلنا نقاط السيولة (أي النقاط 1 على المنحنيات) حصلنا على خط السيولة ،



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

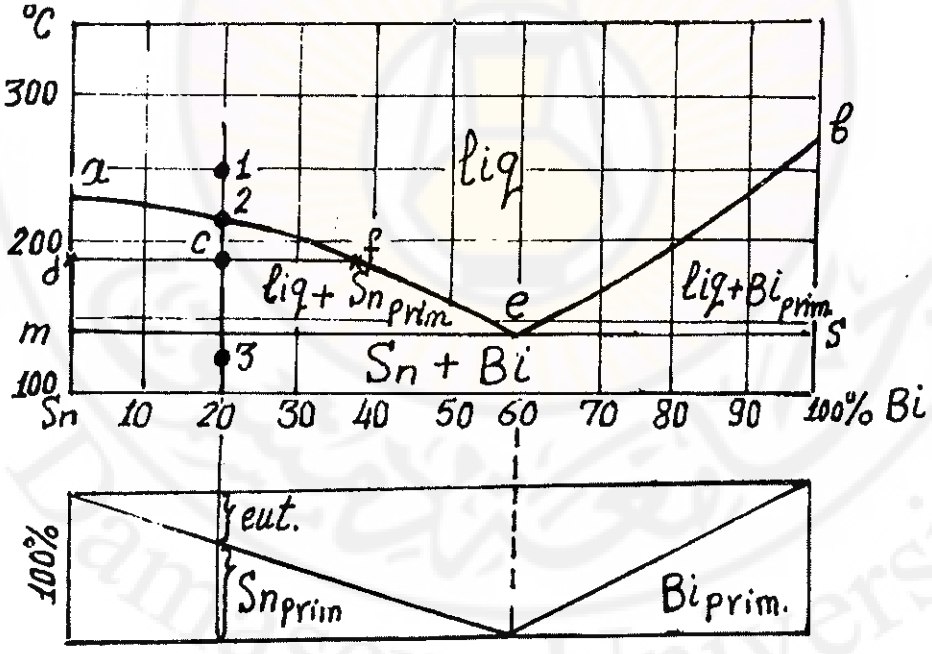
وإذا وصلنا نقاط التجمد (أي النقاط 2 على المنحنيات) حصلنا على خط التجمد • كما أنه بمراقبتنا لبنية العينات نستطيع معرفة الاطوار الموجودة في كل جزءٍ من أجزاء مخطط التوازن • ويُبيِّن لنا الشكل (٦ ــ ٥) مخطط التوازن لخليطة القصدير والبزموت والذي تم إنشاؤه طبقاً لما ذُكر أعلاه •

٦ ــ ٣ ــ الاستنتاجات الممكنة من مخطط التوازن :

يُسمى الخط المنكسر acb الذي يبدأ عنده انفصال البلورات داخل المصهور المعدني بخط السيولة (انظر الشكل ٦ ــ ٥) ، ويُسمى الخط mS الذي ينتهي عنده تبلور الخليطة بشكل كامل خط التجمد • أما النقطة (e) فتُسمى النقطة اليوتكتيكية ، حيث يحدث عند هذه النقطة بالذات مايُسمى التفاعل اليوتكتيكي • ويُعرَّف التفاعل اليوتكتيكي على الشكل التالي : هوتحول طور سائل إلى طورين صلبين عند درجة حرارة ثابتة •

ويحدث تحول هذا الطور السائل الى طورين صلبين فقط في تلك الحالة التي يكون فيها هذا السائل مشبعاً بكلا المعدنين المكونين للخليطة • ومن الشكل (٦ ــ ٥) نلاحظ في حالتنا هذه أن درجة اشباع المحلول السائل بكلا معدني القصدير والبزموت تحدث عندما تكون نسبة القصدير في السائل مساوية 40% ونسبة البزموت 60% • وتختلف نسبة المكونين المؤدية لاشباع المحلول السائل بين خليطة وأخرى ، فمثلا 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 لابـد لنا من التعرف على القواعد المتبعـة عادة في قراءة هذه المخططات واستعمالها من جهـة وعلى طبيعة هذه المخططات من جهـة ثانية . من الشكل (٦ ــ ٥) نلاحظ أن الخطوط a e b و ms تقسم المخطط إلى أربع مناطق . حيث المنطقة I هي المنطقة الوحيدة من بين المناطق الاربع التي تحتوي على طور واحد فقط ، وهذا الطـور 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 الاولية ، والمنطقة III تحتوي على المحلول السائل وبلورات البزموت الأولية ، أما المنطقة IV فتحتوي على بلورات القصدير وبلورات البزموت بشكل طورين صلبين .



الشكل (٦١ ــ ٦) : كيفية دراسة مخطط توازن مجموعة القصدير والبزموت

إذا أردنا معرفة وضع خليطة ما في هذه المجموعة فاننا نبحث أولاً من مخطط التوازن عن تركيز هذه الخليطة ونقيم منه خطاً شاقولياً ، ثم نبحث عن درجة حرارة الخليطة ونحددها على الخط الشاقولي الذي أقمناه عند تركيز الخليطة . عندئذ نحصل على نقطة في احدى المناطق الأربع ، ، فاذا كانت هذه النقطة واقعة في منطقة تجانس فان 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 بحد ذاتها لاتعطينا فكرة عن تركيز هذين الطورين (أي نسبة كل من مكوني الخليطة في كلٍ من الطورين) . ولكن إذا أخذنا من النقطة مستقيماً أفقياً فانه يقطع حدود المنطقة الموجودة فيها النقطة في نقطتين وكل من هاتين النقطتين تعني تركيز أحد طوري الخليطة . وحتى يتضح لنا ماذكرناه نأخذ على سبيل المثال الخليطة الحاوية 20% بزموتاً و 80% قصديراً (انظر الشكل ٦ ــ ٦). نلاحظ 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) فاننا 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 f (على محور التركيز طبعاً) . أما إذا أردنا معرفة كمية كل من هذين الطورين فاننا نطبق مايسمى قانون العتلة وذلك إذا عددنا المستقيم الافقي المار

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

الطور السائل × cf = الطور الصلب × cd .

وسوف نتحدث فيما بعد عن صحة استخدام قانون العتلة هذا فيما يخص الخلائط المعدنية (أي كيف يتم استخدامه في حساب كميات الاطوار المشكلة للخليطة أو حساب تركيز الخليطة الأساسية إذا كانت معروفة كمية الاطوار ... الخ) . ولكن مايهمنا الآن هو كيفية دراسة مخطط التوازن وماهي الاستنتاجات التي من الممكن الحصول عليها من هذه الدراسة . لهذا ولنعد قليلا 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 ينزلق على خط السيولة مبيناً 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 فان هذ االسائل المتبقي يكون مشبعاً بكلا المعدنين كماذكرنا آنفاً وسوف يتجمد المعدنان المشكلان لهذا السائل (أي القصدير والبزموت) معاً وفي درجة حرارة ثابتة وقد أسمينا هذه الحادثة التفاعل اليوتكتيكي ، ولهذا يُسمى المزيج الناعم من بلورات المعدنين المتداخلة والناتجة عن هذا التفاعل اليوتكتيك .

وبهذا الشكل نستطيع دراسة أية خليطة من خلائط 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 الاولى يتم انفصال بلورات من القصدير أو البزموت (وذلك حسب موقع الخليطة المراد دراستها بالنسبة للنقطة e) . ولقد أسمينا هذه البلورات البلورات الأولية (أو البنية الاولية) . 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 كلٍ من البنية الاولية والثانوية باختلاف تركيز الخليطة ونستطيع تقدير نسبة كل منهما في خليطة ما بتطبيق قانون العتلة من جهة وبرسم مخطط البنية (أو مايسمى عادة مخطط النسج) من جهة ثانية (انظر الشكل ٦ ــ ٦) . إذ يُبيِّن هذا الشكل طريقة رسمه وكيفية استخدامه . ولرسم هذا المخطط نرسم مستطيلا تحت مخطط التوازن بحيث يكون طول قاعدته مساويا طول محور التركيز لمخطط التوازن كما يكون ارتفاعه كيفياً ، بحيث نعتمد 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 ، وتتناقص 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 جيبس) على هذه المجموعة . فاذا عدنا الى الخليطة التي قمنا بدراستها مسبقا (انظر الشكل ٦ ــ ٦) وفي المجال الحراري بين

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

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

أما عندما يحدث تجمد كلٍ 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 فان عدد الأطوار عند درجة الحرارة هذه يكون مساوياً 3 (السائل + بلورات القصدير + بلورات البزموت) وعد المكونات لا يزال مساوياً 2 (القصدير + البزموت) ، لهذا وبتطبيق قانون جيبس نجد أن :

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

إن فهمنا لمخططات التوازن يخولنا بالاضافة إلى معرفة التأثيرات الحرارية في الخلائط وتحديد لحظات ظهور أطوار جديدة ، يخولنا في كل لحظة من معرفة نسب الاطوار 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 مجهريا وتحديد نسب الأطوار الصلبة الموجودة فيها بعضها إلى بعض أو بالاحرى تحديد نسب النسج المختلفة بعضها إلى بعض • ولتسهيل هذه العملية يمكن

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

٦ ــ ٤ ــ قانون العتلة واستخداماته في مخططات التوازن :

يحدث أثناء التبلور أن يتغير تركيز الاطوار 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 فانه يمكننا في هذه النقطة أن نحدد كلا من كمية هذين الطورين وتركيزهما ، ويستخدم لهذا الغرض قانون العتلة .

لنبدأ أولا باستخدام قانون العتلة في تحديد تركيز الأطوار المشكلة للخليطة، ونأخذ على سبيل المثال الخليطة K من مخطط التوازن المبين على الشكل (٦ــ٧) وندرس مراحل تبريد هذه الخليطة من الحالة السائلة وماذا يحدث لهذه الخليطة أثناء تبريدها. فعند درجات الحرارة الاعلى من درجة حرارة النقطة l نلاحظ أن الخليطة مؤلفة من طور سائل وحيد متجانس لأن المعدنين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة، ولهذا فان نسبة كل من المكونين للخليطة تتحدد من خلال مسقط النقطة l على محور التركيز . أما عند التبريد لدرجات حرارة أقل من درجة حرارة النقطة l فان 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

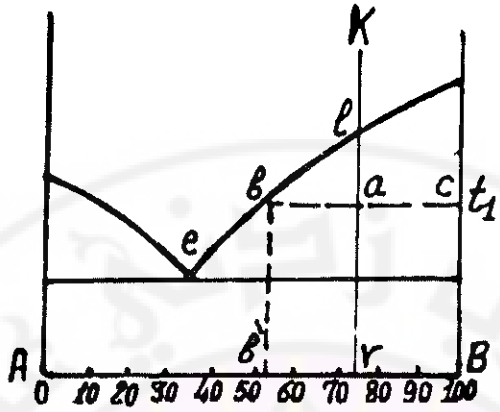
التركيز ونلاحظ من الشكل أن نسبة B في البلورات الصلبة تساوي (100%) وهذا صحيح لأنها بلورات من المكون B النقي •

ونلاحظ أنه بانخفاض درجة الحرارة يتغير تركيز السائل وفق المنحني l_e بينما تركيز الطور الصلب يبقى ثابتاً ، وهكذا حتى نصل إلى درجة حرارة التفاعل اليوتكتيكي فان تركيز السائل يصبح مطابقا لتركيز النقطة e ، ولقد علمنا سابقاً أنه لهذا السائل يحدث التفاعل اليوتكتيكي متحولا الى 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 مامن مخطط التوازن فاننا نمر من هذه النقطة خطاً أفقياً حتى يقطع حدود المنطقة الموجودة فيها النقطة في نقطتين ، وعندها فان 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 فاذا افترضنا محور التركيز كاملاً يعبر عن كمية الخليطة K فان المستقيم r A يحدد كمية المكون B في الخليطة والمستقيم r B 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 ـ ٧) : استخدام قانون العتلة في مخطط التوازن

B في الطور السائل في هذه الحالة يحددها المستقيم A b′ . فاذا 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 :

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

ومنه :

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

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

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

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

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

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

وبهذا الشكل نخلص إلى النتيجة الثانية من قانون العتلةوالتي تنص كمايلي: لتحديد النسبة بين كمية طورين مشكلين لخليطة في نقطة مامن مخطط التوازن فاننا نمرر خطاً أفقيا بهذه النقطة حتى يتقاطع مع حدود المنطقة التي تحتوي على هذه النقطة في نقطتين ، وعندها فان النسبة بين كمية الطورين تتناسب عكسيا مع النسبة بين المستقيمين الواصلين بين هذه النقطة ونقطتي التقاطع .

٦ ـ ٥ ـ مخططات التوازن النظرية :

تتعلق أشكال مخططات التوازن في الخلائط الثنائية بما يلي :

آ ـ قابلية عناصر الخليطة للانحلال بعضها ببعض في الحالة السائلة .

ب ـ قابلية عناصر الخليطة للانحلال بعضها ببعض في الحالة الصلبة ومدى هذه القابلية .

حـ ـ قابلية عناصر الخليطة للاتحاد لتشكيل مركب كيميائي أو مركب معدني .

د ـ قابلية المركبات الكيميائية أو المعدنية المتشكلة لإذابة أحد عناصر الخليطة أو للذوبان فيه .

وبناءً على هذه الشروط آنفة 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

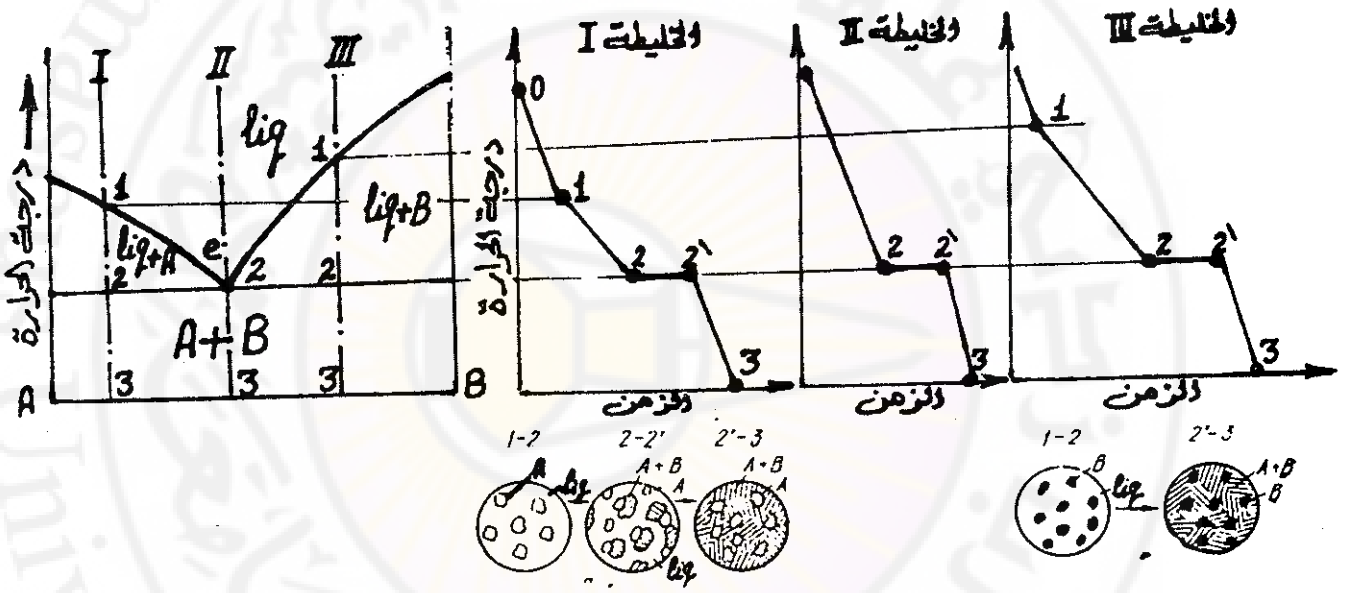
(أي أن يكون تكرارا لاحد المخططات النظرية) أو أن يجمع اثنين أو أكثر من تلك المخططات . ولكن هناك بعض الخلائط التي لاتشبه مخططات توازنها أياً من المخططات النظرية العامة ولا بأي شكل وعندها نستطيع القول أن هذه الخلائط تشكل حالات شاذة بل خاصة ولاتدل إلا على العينة أو الخليطة بذاتها .ولقد تمكن الباحثون في هذا 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 ولايتحدان 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 انشاء مخطط التوازن لخليطة القصدير والبزموت . غير أنه لابد هنا من ذكر بعض الملاحظات الهامة عند دراستنا لهذا النوع من المخططات وهي :

١ً - لايوجد 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 بحت أما في الحقيقة فانه لايمكننا أن نجزم أنه تتوافر خلائط معدنية تكون قابلية ذوبان المعدنين ببعضهما في الحالة الصلبة معدومة .

٢ً - يمكننا أن نقوم بدراسة المراحل التي تمر بها أي عينة من عينات الخليطة الثنائية (أي مايحدث فيها من انفصالات وتحولات) وذلك من خلال



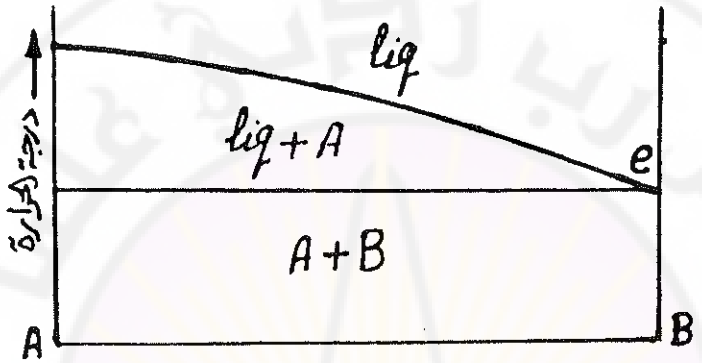
الشكل (٦ ــ ٨) : مخطط التوازن لخليطة تشكل مزيج ميكانيكي مؤلف من بلورات نقية للعنصرين ومنحنيات تبريد ثلاث عينات من هذه الخليطة

رسم منحني تبريد هذه العينة والمستنتج من مخطط التوازن نفسه • فمثلا يبين الشكل (٦ ــ ٨) منحنيات التبريد لثلاث عينات مختلفة نسب العنصرين فيها • فمن الشكل (٦ ــ ٨) نلاحظ أن دراسة منحني تبريد الخليطة I (مثلاً) تظهر لنا مايلي : يُبيِّن الجزء (1 ــ 0) من منحني التبريد كيف يبرد المحلول السائل ، أما الجزء (2 ــ 1) فيبين انفصال بلورات نقية من المعدن A ، وتظهر العتبة الأفقية (2′ ــ 2) التفاعل اليوتكتيكي للسائل المتبقي (أي انفصال بلورات العنصرين A و B دفعة واحدة وعند درجة حرارة ثابتة) ، أما الجزء (3 ــ 2′) فيظهر كيف تبرد القطعة الصلبة المتشكلة حتى درجة الحرارة العادية • وهكذا أيضا يقال عن أجزاء منحني تبريد الخليطة III إلا أن البلورات المنفصلة في هذه الحالة هي بلورات نقية من العنصر B . أما منحني 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 •

٣ً ــ 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 الهيبريوتكتيكية •

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

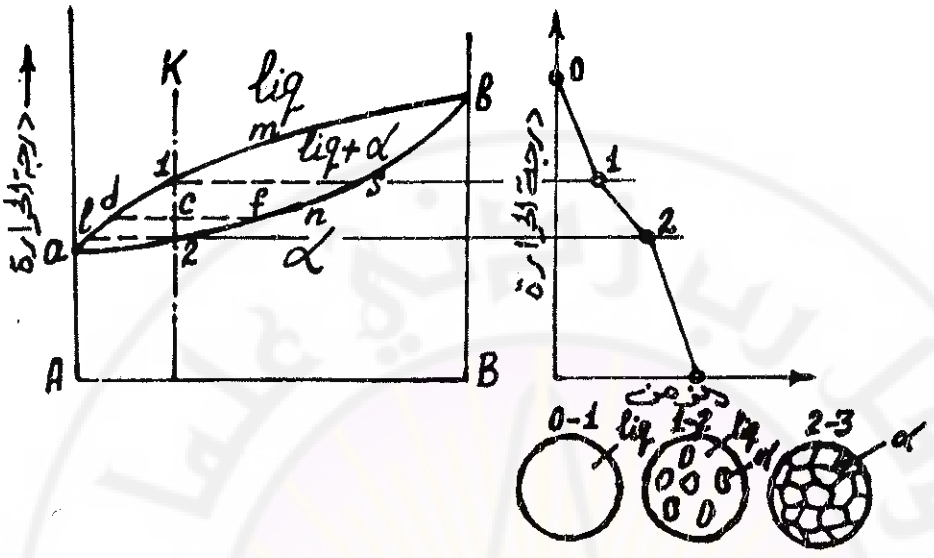
مخطط التوازن (انظر الشكل ٦ ــ ٩)• وفي هذه الحالة يكون تركيب اليوتكتيك ودرجة تجمده هما نفس تركيب ودرجة تجمد المعدن ذي درجة التجمد الاخفض • وعند انتهاء التجمد نجد أن بلورات المعدن ذي درجة الانصهار الاعلى مغلفة ببلورات المعدن الثاني التي تملأ الفراغات التي تركتها الاولى بعد تجمدها •



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

II ــ 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 فانه من الممكن في هذه الحالة أن يتواجد فقط طوران هما : الطور السائل (liq) والمحلول المعدني الصلب (α) ، وبالتالي فانه لايمكن 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 ــ 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 ــ 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 . ويُسمى الخط a m b خط السيولة بينما يسمى الخط a n b خط التجمد . ويظهر منحني التبريد المبين على الشكل (٦ ــ ١٠) مراحل تبريد عينة على مخطط التوازن ، حيث تبين النقطة 1 بداية التبلور والنقطة 2 انتهاء التبلور ، ومابين 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 فان هذه المجموعة تكون أحادية التغير ومن قانون الطور (أو قانون جيبس) نجد أن :

$$F = m - n + 1 = 2 - 2 + 1 = 1 \qquad (6.7)$$

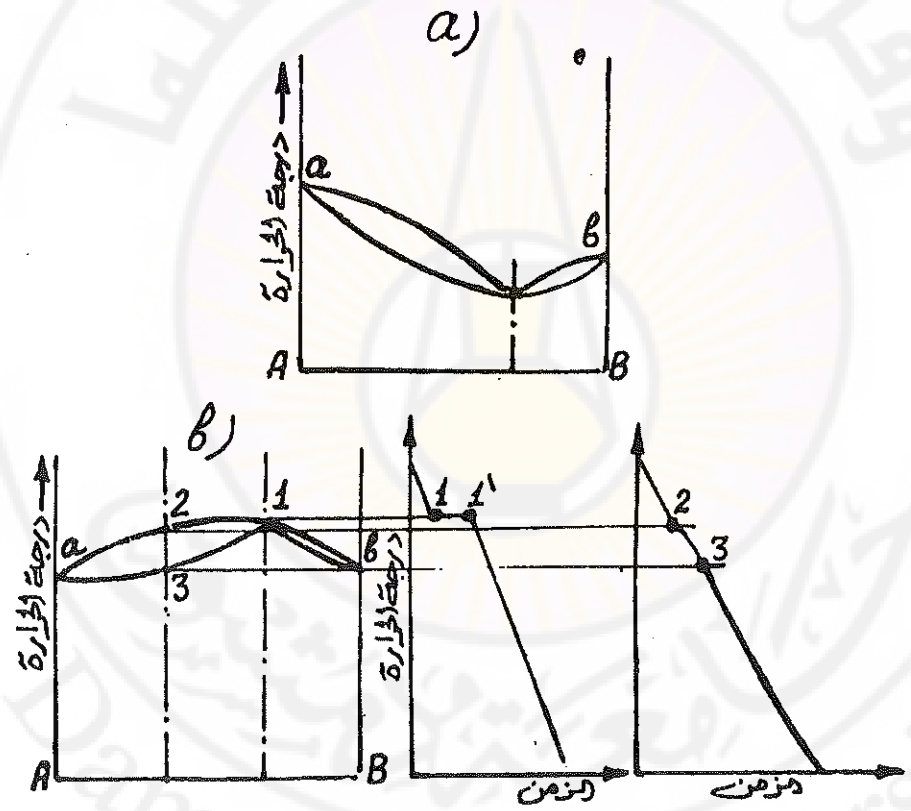
وهذا يعني أنه اذا تغيرت درجة الحرارة فان نسبة العنصرين في كلٍ من الطورين تتغير مع تغير كمية كلٍ من الطورين ، وعند كل درجة حرارة يكون تركيب الطورين محدداً تماماً •

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 f 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 تركيزها 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 ١ . 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 مساويا الذراع الكلي للخليطة في النقطة 2 (أي في لحظة انتهاء تجمد كامل السائل) • ومن الشكل نلاحظ أيضا أن تركيز السائل يتغير وفق المنحني (١ — 1) بينما يتغير تركيز البلورات الصلبة وفق المنحني (2 — S) .

الحالات الخاصة لمخطط التوازن :

إن الحالات الخاصة لمخطط التوازن آنف الذكر تتلخص في كون خط السيولة يتمتع بنهاية عظمى أو نهاية صغرى وعندها فان الخطين (خط السيولة وخط التجمد) سيلتقيان في نقطة واحدة (أي في النقطة التي تشكل النهاية العظمى أو الصغرى ــ انظر الشكل ٦ ــ ١١) .



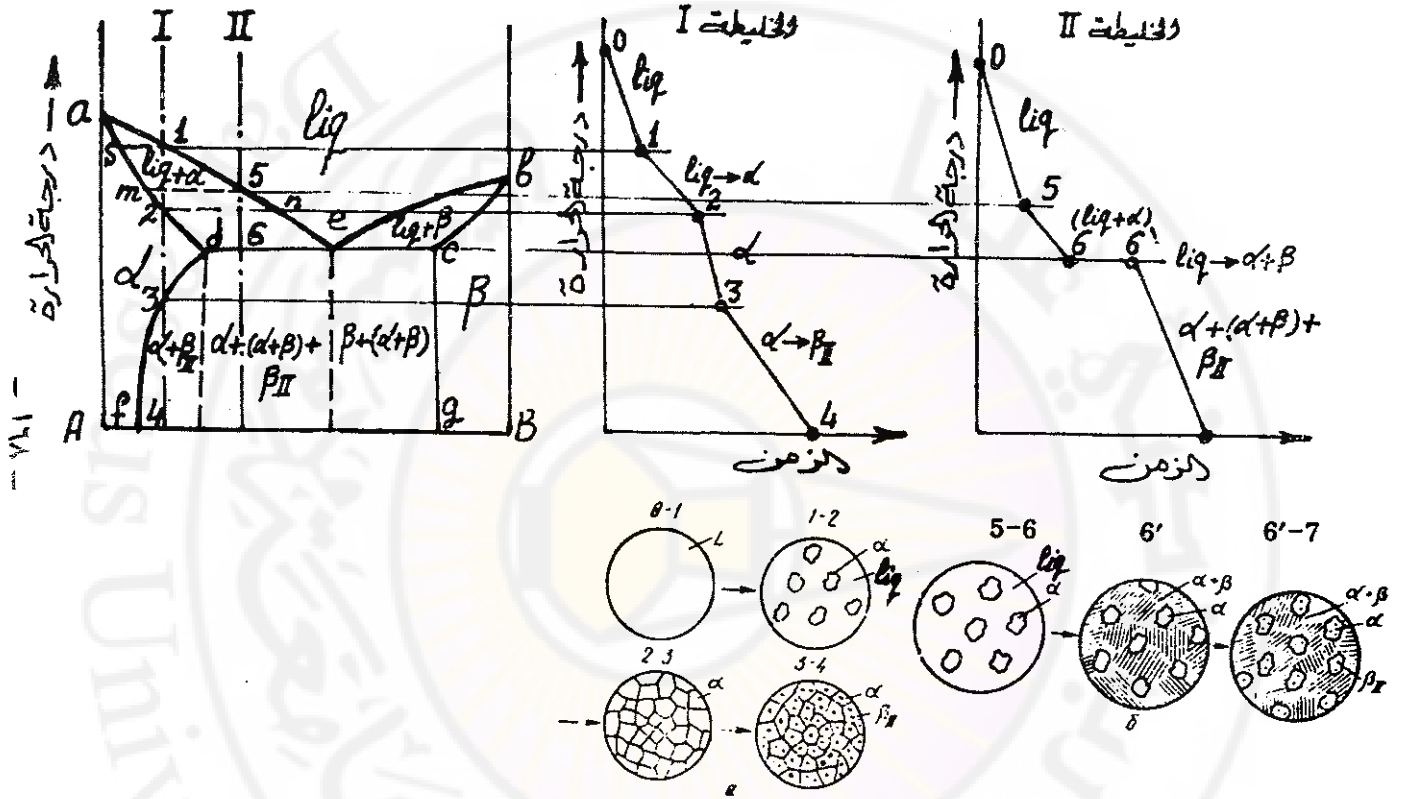
الشكل (٦ ــ ١١) : مخطط التوازن للخلائط التي يكون الذوبان فيها في الحالة الصلبة ذوبانا غير محدود ولكن خط السيولة يتمتع إما بنهاية صغرى (a) او عظمى (b) ومنحنيات التبريد لخليطتين من المخطط (b) .

ولا تختلف دراسة هذه المخططات عن المخطط السابق إلاّ أن العينات التي يكون تركيزها على المخطط هو تركيز النهاية الصغرى (شكل ٦ — ١١ (a) أو تركيز النهاية العظمى (شكل ٦ — ١١ (b) فانه يتم تجمدها 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 لخليطة 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 (ويسمى 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 كلّ من : الطور السائل — المحلول المعدني الصلب α (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 ينفصل من السائل بلورات لمحلول معدني صلب (α أو β) . ولهذا فان المنطقة التي تقع بالقرب من الخط الشاقولي A a هي المنطقة التي تحتوي على المحلول المعدني الصلب α والمنطقة التي تقع بالقرب من الخط الشاقولي B b هي المنطقة التي تحتوي على المحلول المعدني الصلب β ويبيّن الخط d f النسبة الحدية لذوبان العنصر B في الهياكل الشبكية للعنصر A ، بينما يبيّن



الشكل (٦ ــ ١٢) : مخطط التوازن من النوع اليوتكتيكي للخلائط التي يكون الذوبان فيها محدودا في الحالة الصلبة ومنحنيات التبريد لعينتين من هذا المخطط .

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

يُسمى الخط a e b خط السيولة والخط a d c b خط التجمد . ويمكننا ومن خلال معرفتنا الجيدة لكلٍ من قانون الطور وقانون العتلة أن نتتبع مراحل تبريد أي عينة على مخطط التوازن . ولهذا سوف نقوم فيما يلي بدراسة مراحل تبريد العينتين 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 باتفصال بلورات المحلول المعدني الصلب α حيث يتغير تركيزه وفق المنحني (s – 2) ، أما تركيز السائل فيتغير وفق المنحني (n – 1) . وتنتهي عملية التبلور في النقطة 2 وذلك بالحصول على بلورات من المحلول المعدني الصلب α الذي يتمتع بتركيز مطابق لتركيز الخليطة الاساسية . ولن تخضع هذه البلورات لأية تحولات أو انفصالات حتى النقطة 3 الواقعة على الخط d f ، فعند درجات الحرارة الاقل من درجة حرارة النقطة 3 يصبح المحلول المعدني الصلب α مشبعا وتبدأ بلورات مشابهة لبلورات المحلول المعدني الصلب β بالانفصال عنه . ولهذا يمكننا أن نستخدم في المنطقة الواقعة تحت الخط d f قانون العتلة لخليطة مكونة من طورين α و β .

يتغير تركيز المحلول المعدني الصلب α وفق المنحني (f – 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 (f – 3) في تحديد كمية بلورات β المنفصلة عند أي درجة حرارة

نريد • ويُبيِّن لنا الشكل (٦ ــ ١٢) منحني تبريد العينة I وكيفية تشكل بلورات المحلول المعدني الصلب » وكيفية انفصال بلورات β منه •

تُسمى بلورات β المنفصلة من بلورات » البلورات الثانوية ويرمز لها بالرمز β_{II} وذلك لتمييزها عن بلورات β_{I} المنفصلة من السائل مباشرة مع العلم أن كليهما يتمتع بالتركيب نفسه • ويجب أن ننوه هنا الى مايلي :

١ً ــ إن أي خليطة يقع تركيزها على يسار الخط d f لا تحتوي على بلورات β الثانوية •

٢ً ــ إن وجود الخط c g على مخطط التوازن شاقوليا يعني أن ذوبان العنصر A في الهياكل الشبكية للعنصر B لا يتعلق بدرجة الحرارة ــ أي أنه لن يحدث انفصال بلورات من النوع » بانخفاض درجة الحرارة ، ويمكن أن يحدث مثل هذا النوع من الانفصالات لو كان الخط c g يتمتع بشكل مشابه للخط d f (أي لو كان الخط c g مائلاً نحو اليمين على مخطط التوازن) •

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

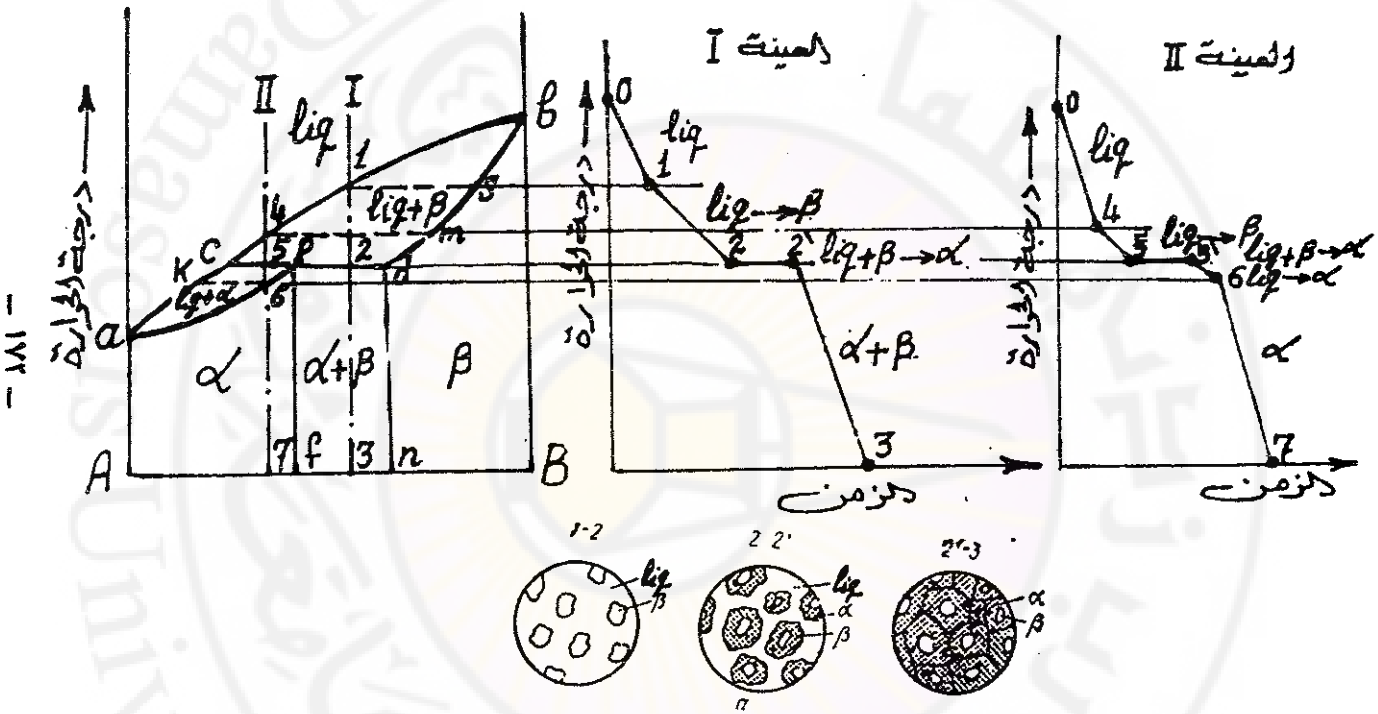
العينة II : عند تبريد هذه العينة وابتداءً من النقطة 5 يبدأ انفصال بلورات » ، وعند الوصول الى النقطة 6 (أي الى الخط الافقي d c c) تصبح المجموعة محتوية على ثلاثة أطوار (الطور السائل الذي يطابق تركيزه تركيز النقطة e ، وبلورات » ذات التركيز في النقطة d ، وبلورات β ذات التركيز في النقطة c) وعند ذلك يحدث التفاعل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

$$liq_{(e)} \xrightarrow{T = const} \alpha_{(d)} + \beta_{(c)} \qquad (6.8)$$

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

IV – مخطط التوازن لخليطة 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 كبير (ويُسمى عادةً مخطط التوازن من النوع البيرتكتيكي للخلائط التي يكون الذوبان فيها محدودا في الحالة الصلبة) •

لقد تبيَّن لنا سابقا أن التحول اليوتكتيكي يعني تحول الطور السائل الى طورين صلبين عند درجة حرارة ثابتة • ولكنْ 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 الاولية التي انفصلت لتوها منه معطياً بلورات من نوع جديد ، ويحدث هذا التفاعل عند درجة حرارة ثابتة ويُسمى التفاعل البيرتكتيكي • ويُبيِّن 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 : ($liq + \beta$) و ($liq + \alpha$) و ($\alpha + \beta$) .



الشكل (٦ ــ ١٣) : مخطط التوازن من النـوع البيرتكتيكي للخلائط التي يكون الذوبان فيها محدودا في الحالة الصلبة ومنحنيات التبريد لعينتين مـن مخطط التوازن .

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

العينة I : يبدأ تبلور العينة في النقطة 1 وذلك عندما تبدأ بلورات المحلول المعدني الصلب β وذات التركيز في النقطة s بالانفصال 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 البيريتكتيكي يصبح تركيز السائل مطابقاً للنقطة c وتركيز الصلب مطابقا للنقطة d ، عندها يتفاعل هذان الطوران مع بعضهما عند درجة حرارة ثابتة معطيان طورا جديدا هو α ذو التركيز في النقطة p (وهي النقطة الثالثة على الخط الافقي) :

$$liq_{(c)} + \beta_{(d)} \xrightarrow{T = const.} \alpha_{(p)} \qquad (6.9)$$

من الشكل (٦ ــ 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 pf و dn شاقوليان • ومن الشكل (٦ــ١٣) نلاحظ أن النسبة بين كمية الطورين المشاركين في التفاعل البيرتكتيكي والمعطيين الطور α يمكن ايجادها باستخدام قانون العتلة وذلك وفق مايلي :

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

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

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

$$\frac{c2}{2d} = \frac{\text{كمية الطور الصلب } \beta}{\text{كمية الطور السائل liq}} \qquad (6.11)$$

وهذا يعني أن هذه الخليطة تحتوي على كمية زائدة من الطور الصلب β وذلك بالمقارنة مع كمية هذا الطور اللازمة لتشكل الطور α 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 α (الناتجة عن التفاعل البيرتكتيكي) وبلورات β الزائدة عن حاجة هذا التفاعل . أما عندما يكون تركيز العينة مطابقا للنقطة p فان النسبة بين كمية الطور الصلب β والطور السائل هي النسبة الضرورية والكافية لتشكل بلورات الطور α 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 وتشكل الطور α ذي التركيز في النقطة p . ولهذا فان التحول البيرتكتيكي ينتهي باختفاء المحلول المعدني الصلب β ونحصل من هذا التفاعل على الطور α وكمية السائل الزائدة عن حاجة هذا التفاعل . وباستمرار التبريد بين النقطتين 5 و 6 يستمر تحول السائل الى البلورات α ، أي أنه عند درجة الحرارة الاقل من النقطة 6 تصبح بنية الخليطة مؤلفة من المحلول المعدني الصلب α فقط . ومن الشكل (٦ ــ ١٣) نلاحظ أنه عندما يتحول السائل المتبقي الى الطور α فان تركيزه يتغير وفق المنحني (c – K) أما تركيز بلورات α

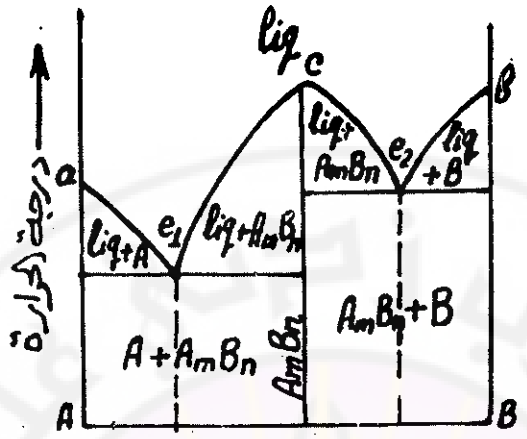
المتشكلة منه فيتغير وفق المنحني (p – 6)

٧ – 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 اذابتهما (ويُسمى عادةً مخطط التوازن للخلائط التي تشكل مركبا كيميائيا مستقرا) •

يتميز المركب الكيميائي وكما أوضحنا سابقا بنسبة محددة من كلٍ من العنصرين المشكلين لهذا المركب ، وينعكس هذا على مخطط التوازن على شكل مستقيم شاقولي يمر من محور التركيز في نقطة تحدد نسبة كلٍ 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 وحيدا ومستقرا هو $A_m B_n$ وأن كلاً 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 مكونٍ واحد وعندها فان :



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

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

نلاحظ من الشكل (٦ ــ ١٤) أن الخط الشاقولي الذي يُبيِّن النسبة التي يتكون 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 عنصراها هما المعدن A والمركب $A_m B_n$ ، أما القسم الايمن منه فهو مخطط توازن للمعدن B والمركب • وتتصرف المركب $A_m B_n$ في كلٍ من جزئي المخطط هو تصرف أي معدن صاف من حيث تجانس البلورات وتشكل اليوتكتيك • ونود هنا أن ننوه الى مايلي:

١ً ــ إن كلاً من المزيج اليوتكتيكي e_1 و e_2 ينتجان من التفاعلين التاليين :

$$e_1 \text{ المزيج اليوتكتيكي } \quad liq_{(e_1)} \xrightarrow{T = const} A + A_m B_n \qquad (6.13)$$

$$e_2 \text{ المزيج اليوتكتيكي } \quad liq_{(e_2)} \xrightarrow{T = const} B + A_m B_n$$

٢ً ــ يبدأ انفصال البلورات الاولية من المركب الكيميائي $A_m B_n$ على كلٍ من الخطين $e_1 c$ و $e_2 c$. ولهذا فان البنية النهائية للخلائط الهيبريوتكتيكية في القسم الايسر من مخطط التوازن والخلائط الهيبويوتكتيكية في القسم الايمن من المخطط تتألف في حالتها الصلبة من بلورات المركب الاولية والمزيج اليوتكتيكي e_1 أو e_2 .

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

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

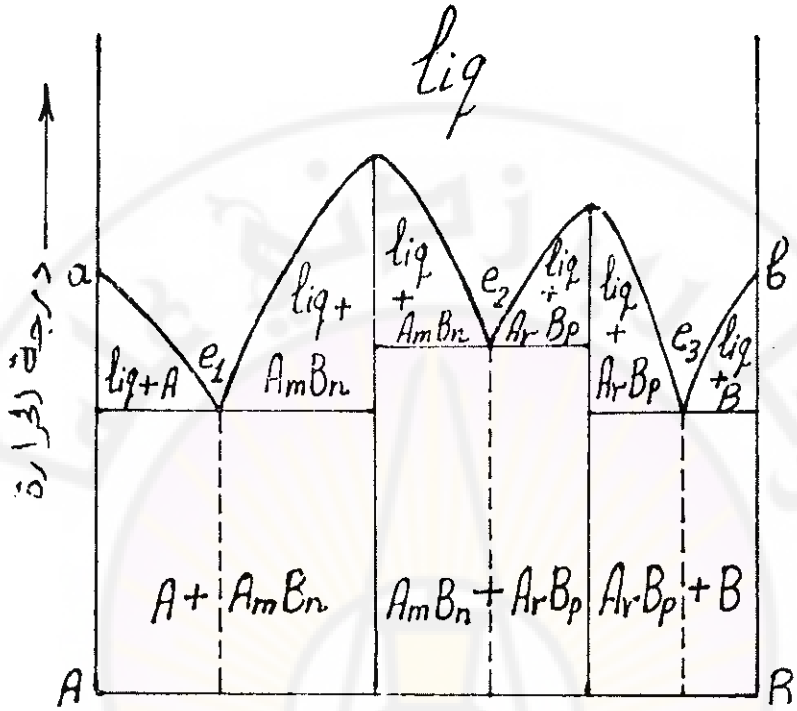
$$\beta = \frac{b A_1}{b A_1 + a B_1} \cdot 100 \qquad (6.15)$$

حيث : a و b ــ النسبة الكتلية للمكونين A و B في المركب •

A_1 و B_1 ــ الوزن الذري للمكونين A و B .

α و β ــ النسبة الذرية للمكونين في المركب •

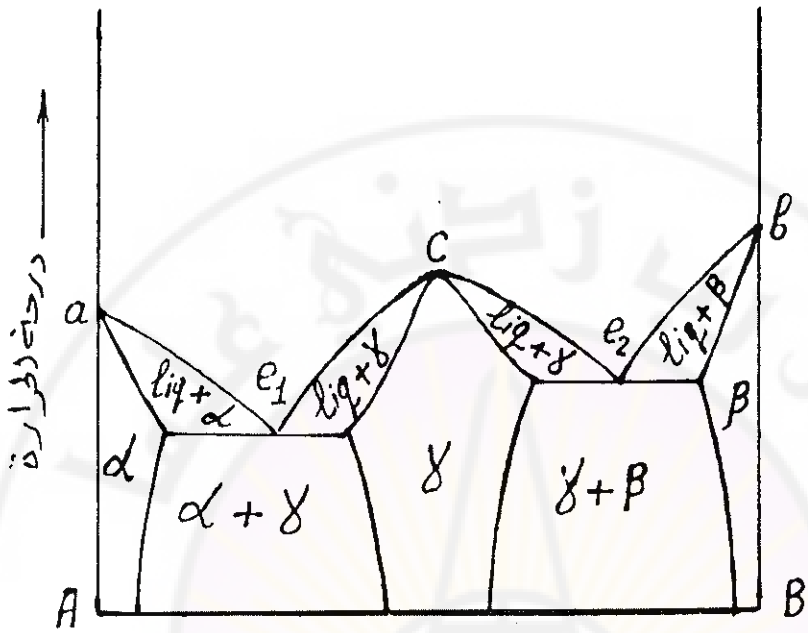
٤ً ــ اذا كان العنصران A و B يشكلان فيما بينهما مركبين كيميائيين أو ثلاثة أو أربعة ••• الخ فان مخطط التوازن يتألف في هذه الحالة من ثلاثة مخططات أو أربعة (أو أكثر من ذلك) من مخططات التوازن البسيطة (أي مخططات التوازن من النوع اليوتكتيكي الاول ــ انظر الشكل ٦ــ١٥)•



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

حالة خاصة :

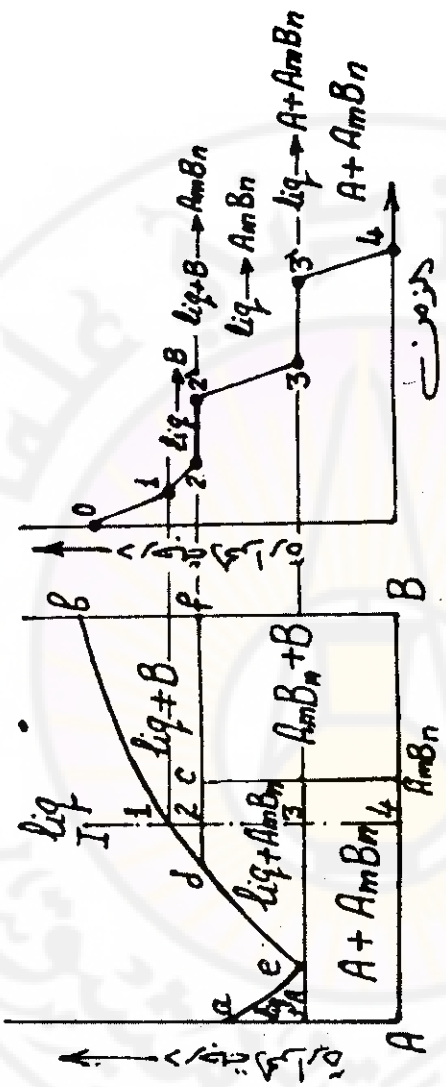
اذا كان العنصران A و B يذوبان ببعضهما بشكل محدود في الحالة الصلبة ويشكلان أيضا محلولاً صلباً قاعدته المركب الكيميائي ويستطيع هـذا الاخير أن يذيب نسبة معينة من كلٍ من المحلولين الصلبين الاولين فان مخطط التوازن يبدو كما هو موضح على الشكل (٦ــ١٦). فمن هذا الشكل نلاحظ أن المحلولـين الصلبين α و β قاعدتهما العنصران A و B : أما المحلول الصلب γ فقاعدته المركب المعدني $A_m B_n$.



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

VI ــ مخطط التوازن لخيطة مؤلفة من عنصرين يذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة ولايذوب أي منهما في الآخر في الحالة الصلبة ويتحدان مع بعضهما لتشكيل مركب كيميائي لا ينصهر عند درجة حرارة ثابتة وانما في مجال حراري معين (ويسمى عادة مخطط التوازن للخلائط التي تشكل مركباً كيميائيا 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 ــ ١٧) ينحصر في أن تسخين المركب الناتج من الاخيرة الى درجة حرارة معينة (t_1) يسبب تحول هذا المركب إلى سائل وبلورات لعنصر من عنصري الخليطة ــ أي أن هذا المركب لاينصهر بكامله عند هذه الدرجه من الحرارة .وكما عرفنا من المخططات السابقة فان الخط الأفقي d c f يعني تواجد



الشكل (٦ ـ 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 الـذي 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 فانه يتفكك متحولاً الى سائل تركيزه في النقطة d

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

$$liq_{(d)} + B_{(f)} \xrightarrow{T = const.} A_m B_n{}_{(c)} \qquad (6.16)$$

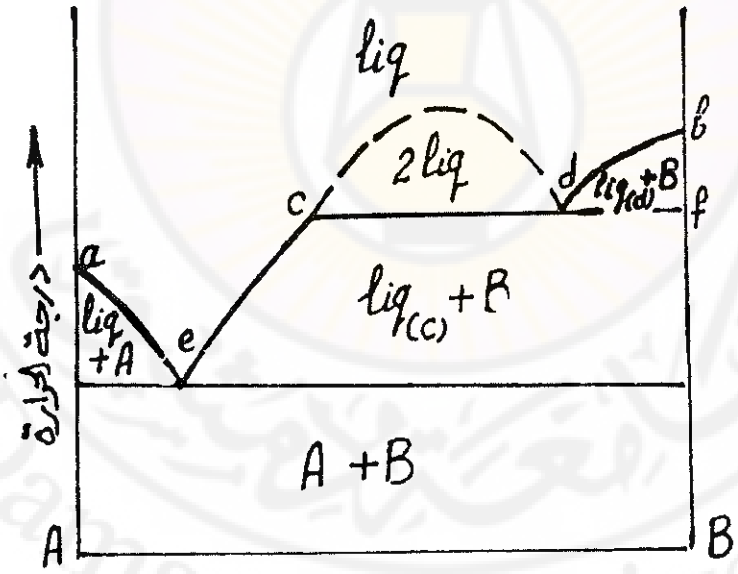
وهذا التفاعل يشبه التفاعل البيرتكتيكي الذي رأيناه سابقـا إلا أن السائل هنا يتفاعل مع البلورات الصلبة التي انفصلت منه مسبقاً معطيا مركبا كيميائيا وليس محلولاً معدنيا صلبا • ولفهم طبيعة هذا النوع من المخططات نقوم فيمايلي بدراسة مراحل تبريد عينة منه ونبيّن ماهي التحولات والانفصالات التي تطرأ على هـذه العينة من الحالة السائلة وحتى درجة الحرارة العادية •

العينـة 1 : يبدأ تبلور السائل في النقطـة 1 بتشكل بلورات من العنصر B النقية وعندها يتغير تركيز السائل وفق المنحني (d – 1) . وفي النقطة 2 وعند درجة حرارة ثابتة يتشكل المركب الكيميائي غير المستقر وذلك وفق المعادلة (6.16) . وبانتهاء التفاعل البيرتكتيكي المؤدي لتشكل المركب تتبقى كمية من السائل زائدة عن التفاعل •وباستمرار التبريد للعينة يستمر تبلور هذه الكمية من السائل معطيةً بلورات من المركب الكيميائي $A_m B_n$ ، وهكذا حتى يصبح تركيز السائل مطابقاًلتركيز النقطة اليوتكتيكية e ، عندها يتفاعل السائل المتبقي بعد عملية التبلور هذه تفاعلاً يوتكتيكياً عند درجة حرارة ثابتة معطياًبلورات مـن العنصر A وبلورات من المركب الكيميائي $A_m B_n$ على شكل مزيج يوتكتيكي•

وهكذا نلاحظ وجـود عتبين أفقيتين على منحني التبريد : الاولى تظهر حـدوث التفاعل البيرتكتيكي عند درجة حرارة ثابتة وتشكل المركب الكيميائي غير المستقر واختفاء بلورات العنصر B ، والثانية تظهر حـدوث التفاعل اليوتكتيكي عنـد درجة حرارة ثابتة أيضاً وتشكل المزيج اليوتكتيكي المؤلف من بلـورات العنصر A وبلورات المركب الكيميائي $A_m B_n$.

VII ـ مخطط التوازن لخليطة مؤلفة من عنصرين لايذوبان ببعضهما بشكل مطلق في الحالة السائلة وعديمي الذوبان ببعضهما في الحالة الصلبة (ويُسمى 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 لايلبث أن ينقسم إلى طورين سائلين ـ 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 c وذلك وفق المعادلة التالية:

$$liq_{(d)} \xrightarrow{T = const.} liq_{(c)} + B_{(f)} \qquad (6.17)$$



الشكل (٦ ـ 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 المحاولين السائلين عن بعضهما بعضاً يتم على الخط المنحني المتقطع بين النقطتين c و d (انظر الشكل ٦ ــ 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 cd ، حيث يصبح تركيز السائل مطابقاً لتركيز النقطة d (وهو السائل الذي يدخل في التفاعل المونوتكتيكي وفق العلاقة السابقة) . والخط ec فيعني بدء ظهور 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 وعنده يتم التفاعل اليوتكتيكي معطياً بلورات ثانوية لكلا العنصرين A و B .

٦ ــ ٦ ــ مخططات التوازن للخلائط التي تتمتع مكوناتها بتغيرات آلوتروبية :

بيّنا سابقاً (انظر البند ٤ ــ ٥ من الفصل الرابع) أن بعض المعادن (مثل الحديد) تتغير تغيراً آلوتروبياً في الحالة الصلبة ــ 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 ــ 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 فان 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 الثنائيةهو أحد تلك المعـادن التي تتغير تغيراً آلوتروبياً فان لهذا التغير تأثيره في جزء من مخطط التوازن أو في مخطط التوازن بكامله وذلك حسب نوع المخطط الذي تشكله الخليطـة • وقبل أن نرى التغيرات الآلوتروبية في مختلف مخططات التوازن يجب أن نعلم أن التغير الآلوتروبي هـذا لا يحـدث غالبا في الخلائط إلا في حالتين :

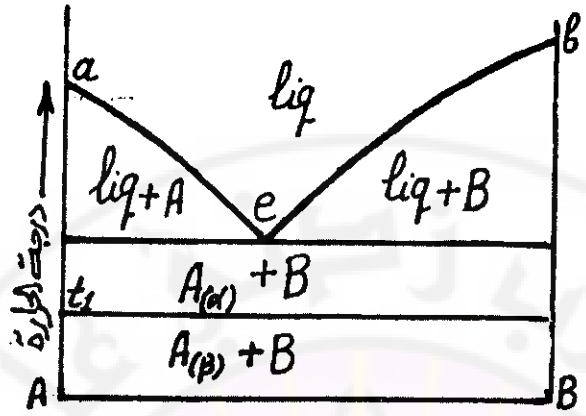
آ ــ إذا كان المعدن القابل للتغير موجـوداً في الخليطة على شكل بلـورات نقية منفصلة •

ب ــ إذا كان هذا المعدن موجوداًفي الخليطة بشكل محاول صلب يقـوم فيه بدور المذيب •

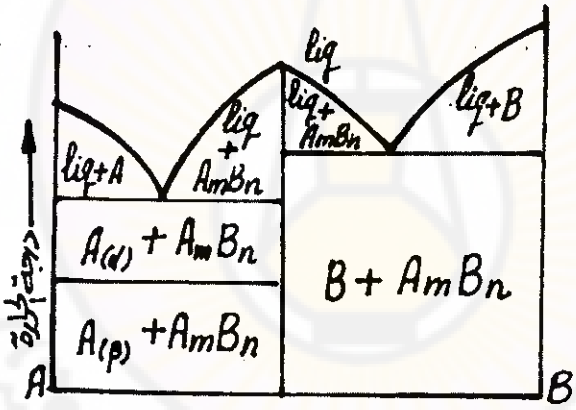
ولدراسة هذه التغيراتفي مختلف أنواع مخططات التوازن يكفي أنندرسها في الأنواع الخمسة التالية نظراً للتشابه بينها وبين الانواع الاخرى التيسوف لن نتعرض لها •

١ً ــ إذا كان مخطط توازن الخليطة من النوع الذي يتشكل فيـه مزيج ميكانيكي من بلورات نقية لكلا العنصرين (أي مخطط من النـوع اليوتكتيكي العادي ــ انظر الشكل ٦ ــ ١٩) • وأحد المعدنين وليكن A يتغير آلوتروبيافي الدرجة t_1 فان درجـة حرارة التغير هذه لاتختلف مهما اختلفت نسبة الخليطة وذلك لأننا وكما نعلم أنالمنطقة الواقعـة تحت خط التجمد الأفقي هي منطقـة عدم تجانس أي أن كلا المعدنين موجود فيها بشكله الصافي لذلك فان درجةالحرارة التي يتغير عندها A تبقى ثابتة ويظهر ذلك على مخطط التوازن على شكل خط أفقي يمتد حتى نهاية المخطط •

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



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



الشكل (٦ ــ ٢٠) : مخطط التوازن الذي يحتوي على مركب كيميائي مستقروالعنصر A يتغير آلوتروبيا عند (t_1) .

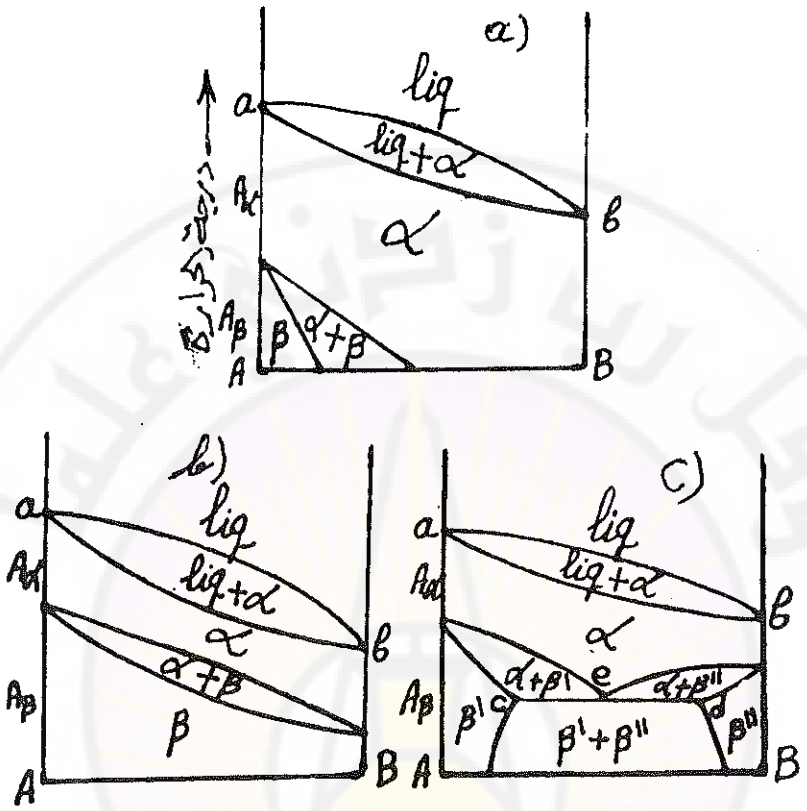
المعدنين أي أحد عنصري الخليطة (A) يتغير تغيراً آلوتروبيا في الدرجة t_1 فان هذا التغير يتم في درجة حرارة ثابتة وعلى خطأفقي يمتد من النقطة t_1 حتى الخط الشاقولي المشير للتركيز الذي يتم عنده تشكل المركب الكيميـائي للسبب نفسه الذ يذكرناه في الحالة السابقة ، أما في الجزء الواقع على يمين المركبفليس

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 ــ ٢٠).

٣ً ــ 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 الاول تشابه الهياكل الشبكية للمعدن الثاني . ولهذا يمكن أن نقول إن المعدن المتغير آلوتروبياً لم يعد يوجد هنا بشكله النقي وان درجة الحرارة التي يحدث عندها التغير أصبحت غير ثابتة بل إنها قد تنخفض أو ترتفع كلما زادت نسبة المعدن الثاني في المحلول الصلب ، كما ان التغير نفسه لم يعد يتم في درجة حرارة ثابتة بل في مجال حراري معين . وعلى هذا الاساس 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 تتشابه 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 :

آ ــ المخطط الأول (انظر الشكل ٦ ــ ٢١ (a)) : ويبين أن التغير الآلوتروبي يحدث للمعدن A فقط و في هذه الحالة تكون الهياكل الشبكية للمعدن B مشابهة لنهايل الشبكية للمعدن A قبل حدوث التغير الالوتروبي فيه (أي أن هياكل B تشابه هياكل $A_{(\alpha)}$) .



الشكل (٦ ــ ٢١) : مخططات التوازن للخلائط التي يكون الذوبان فيها غير محدود في الحالة الصلبة واحد المعدنين او كلاهما يتغير تغيرا آلوتروبيا عند درجات حرارة معينة .

ب ــ المخطط الثاني (انظر الشكل ٦ ــ ٢١ b) : ويبين أن التغير الآلوتروبي يحدث في كلا المعدنين.

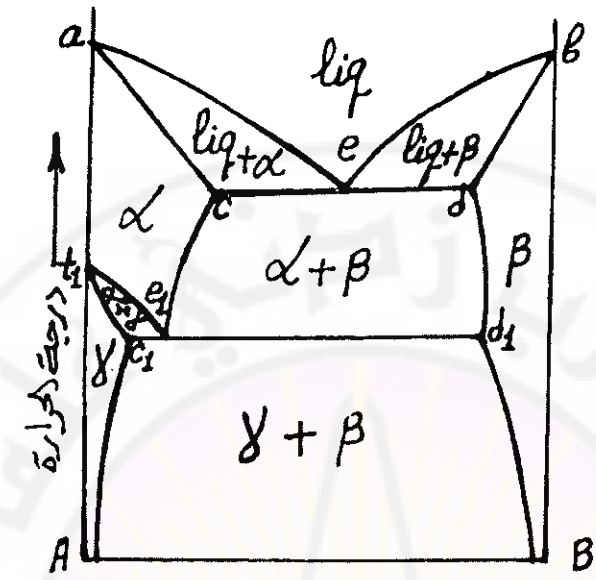
وفي هذه الحالة تكون الهياكل الشبكية لكل من $A_{(\alpha)}$ و $B_{(\alpha)}$ متشابهة ولكل من $A_{(\beta)}$ و $B_{(\beta)}$ متشابهة أيضا وجميعها تشكل محاليل صلبة يكون الذوبان فيها مطلقاً .

حـ ــ المخطط الثالث (انظر الشكـل ٦ ــ ٢١ c) : ويُبين أن التغـير الآلوتروبي يحدث في كلا المعدنين أيضا ، إلا أن الذوبـان هنا في الحالة الصلبـة يكون مطلقاً في درجات الحرارة المرتفعـة (أي قبـل حدوث التغير الآلوتروبي) ولكنه يتحـول إلى ذوبان محـدود بانخفاض درجة الحرارة وتتشكل محاليل صلبة تكون نسبة الذوبان فيها محدودة • وهكذا نلاحظ أنه من المحلول الصلب « وباستمرار التبريد ينفصل أحـد المحلولين الصلبين (β' أو β'') ، ويستمر هذا الانفصال حتى الخط c e d حيث يتحـول الطور الصلب « الى طورين صلبين هما β' و β'' وعند درجة حرارة ثابتة وذلك وفق التفاعل التالي:

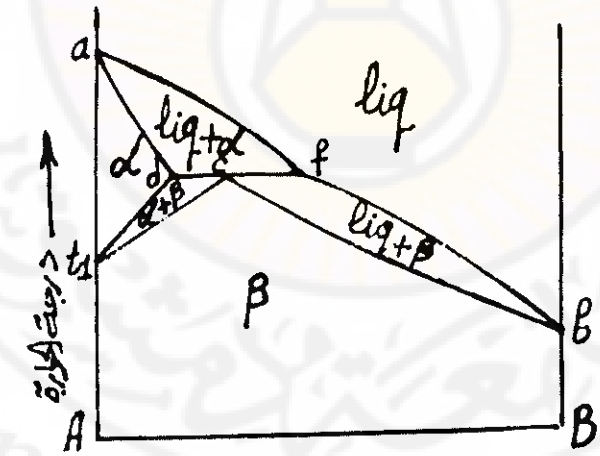
$$\alpha \xrightarrow{T = const} \beta' + \beta'' \qquad (6.18)$$

ويُسمى هـذا التحول للطـور الصلب عند درجـة حـرارة ثابتة التفاعل اليوتكتويدي ويتشكل بنتيجته مزيج ميكانيكي مؤلف من طورين متجانسين على غرار التفاعل اليوتكتيكي •

٤ً ــ إذا كان مخطط التوازن من النوع اليوتكتيكي وكان الذوبان محدوداً في الحالة الصلبة والمعدن A (مثلا) يتغير تغيراً آلوتروبياً عند الدرجة t_1 فان مخطط التوازن يصبح من النوع الموجـود على الشكل (٦ ــ ٢٢) • وكما نلاحظ من الشكل أن التغير الآلوتروبي يتم في المحلول الصلب الذي قاعـدته المعدن A (أي المحلول «) بالشكل نفسه الذي تم في الأمثلة السابقة • وكما نلاحظ أيضاً أن النقطة e_1 تعني نقطة التقاء ثلاثـة 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 أحـد هذه الأطوار وهو ماأطلقنـا عليه في مثالنا السابق التفاعل اليوتكتويدي •



الشكل (٦ ــ ٢٢) : مخطط توازن من النوع اليوتكتيكي والذوبان محدود في الحالة الصلبة والمعدن A يتغير تغيرا آلوتروبيا عند الدرجة t_1



الشكل (٦ ــ ٢٣) : مخطط توازن من النوع البيرتكتيكي والذوبان محدودفي الحالة الصلبة والمعدن A يتغير آلوتروبيا عند الدرجة t_1

٥ً ــ إذا كان مخطط التوازن من النوع البيرتكتيكي وكان الذوبان محدودا في الحالة الصلبة والمعدن A (مثلاً) يتغير تغيراً آلوتروبيا عند الدرجة t_1 فان مخطط التوازن يصبح من النوع الموجود على الشكل (٦ ــ 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 مطلقا في الحالة الصلبة .

* * *

الفصل السابع

أهم الخواص الفيزيائية للمعادن والخلائط المعدنية

٧ ـ ١ ـ الوزن النوعي للمعادن والخلائط المعدنية :

يعرّف الوزن النوعي على أنه وزن واحدة الحجوم من المادة ، أماالحجم النوعي فهو حجم واحدة الأوزان . ومن المعروف أن وحدة قياس الوزن النوعي هي إما الغرام/سم^3 أو الكغ/دم^3 ؛ وتتفق هاتان الوحدتان من حيث القيمة الرقمية . وتتراوح الأوزان النوعية للمعادن مابين ١ر٧ غ/سم^3 (وهو الوزن النوعي للمغنزيوم) و ١٩ر٣ غ/سم^3 (للذهب) .

وبما أن المعادن ذات بنية بلورية في الحالة الصلبة فانه 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 :

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

حيث : n ـ عدد ذرات الهيكل الشبكي الواحد .

A ـ الوزن الذري للمعدن .

V ـ حجم الهيكل الشبكي .

N ـ رقم لوشميدث الذي يساوي ٦ر٠٢٥ × ١٠^{٢٣} ذرة .

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

$$\gamma_{Fe} = \frac{2 \cdot 55,84}{6,025 \cdot 10^{23} \times (2,86 \cdot 10^{-8})^3} = 7,86 \quad g/cm^3$$

$$\gamma_{Cu} = \frac{4 \cdot 63,54}{6,025 \cdot 10^{23} \times (3,61 \cdot 10^{-8})^3} = 8,95 \quad g/cm^3$$

أما عند خلط معدنين أو أكثر فانه نادراً مايحدث تغير في الحجم أي أنحجم الخليطة هو مجموع حجوم العناصر الداخلة فيتكوينها وبما أن وزن الخليطة أيضاً هو مجموع أوزان مكوناتها فالوزن النوعي للخليطـة يتناسب مع نسبة تركيزها الحجمي كما أن حجمها النوعي يتناسب مع نسبة تركيزها الوزني .فالحجم النوعي للخليطـة الثنائية هو :

$$V_{al.} = X_w \cdot V_A + (1 - X_w) \cdot V_B \qquad (7 \cdot 2)$$

أما الوزن النوعي لهذه الخليطة فهو :

$$\gamma_{al.} = \frac{1}{\frac{X_w}{\gamma_A} + \frac{1 - X_w}{\gamma_B}} = X_V \gamma_A + (1 - X_w) \gamma_B \qquad (7 \cdot 3)$$

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

V_A ، V_B ـ الحجوم النوعية للمعدنين A و B .

X_w ـ النسبة الوزنية و X_V ـ 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 النسبةالحجمية لكلٍ من عنصري الخليطـة :

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

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

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 لاتصلح 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 الحجوم 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 الآلوتروبي – اختزان الحرارة – التمدد الحراري • وسوف نتعرف فيما يلي على تعريف كل من هذه الخواص وأهم مايميزها •

٧ – ٢ – ١ – الحرارة النوعية : تُعرّف الحرارة النوعية على أنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحدة الكتل من المادة درجة مئوية واحدة ، ولهذا تكون

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

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

$$c_p = a + b\,T + c\,T^2 + dT^{-1/2} + e\,T^{3} \qquad (7.6)$$

حيث : a, b, c, d, e – قيم ثابتة لكل معدن على حدة •

T – درجة الحرارة مقيسة بالـ $^{\circ}K$ (الكلفين) أي المئوية بدءاً من الصفر المطلق •

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

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

حيث : c_A و c_B – الحرارة النوعية لكلٍ من المعدن A والمعدن B بالترتيب •

وتعد قاعـدة المزج آنفة الذكر صالحة حتماً في الخلائط غير المتجانسة والتي تحتوي على كلٍ من عناصر الخليطة بشكل مستقل كما أنهاتصلح في كثير مـن الخلائط ذات المحاليل الصلبة المتجانسة أو ذات المركبات • وقد ثبت تجريبياً وعن طريق القياسات أن الحرارة النوعية المقيسة في بعض الخلائط ذات المحاليل الصلبة مثـل : Ag – Au و Fe – Ni وبعض الخلائط ذات المركباتمثل Al – Cu و Al – Mg و Mg – Si وغيرها لاتختلف 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 ماتستعمل في الحساباتالنظرية الحرارةالنوعيةالذرية وهيالحرارةالنوعيةللوزنالذريالغراميحين $C_p = A \cdot c_p$ • وينطبق على الحرارة النوعية الذرية كل ماقيل في البند السابق ابتداءً من العلاقة بدرجة الحرارة وانتهاءً بامكان تطبيق قاعـدة المزج في حساب الحرارة النوعيـة للخلائط المعدنية أو عـدم امكان تطبيق هذه القاعـدة • لهذا تبقى المعـادلة آنفة 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 علـى التغلب على قوى الارتباط في الهياكل الشبكية • لهذا تتعلق كمية الحرارة هـذه بنوع المعدن (أي بمقدار قوى الارتباط الموجودة بين ذراته) • وبما أن كمية حرارة المعـدن تزداد عند انصهاره في الوقت الذي تكون فيه درجة حرارتـه ثابتة فـان الحرارة

النوعية تفقد معناها الفيزيائي ، لذا تحـدد كمية حـرارة الانصهـار بما يسمى الانتالبيا النوعية h_m ووحدة قياسها [$\frac{cal}{g}$ ، $\frac{J}{kg}$] . وغالباً ماتحددحرارة الانصهار هذه (أو الانتالبيا النوعية) بشكل تقريبي بالمعادلة التالية :

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

حيث : T ـ درجة حرارة الانصهار بدءاً من الصفر المطلق •

٧ ـ ٢ ـ ٤ ـ حرارة التغير الآلوتروبي : تعرّف حرارة التغير الآلوتروبي على أنها كمية الحرارة التي تكتسبها ذرات المعدن عند درجة حرارة ثابتة وذلك كي تعيد بناء هياكلها الشبكية والمعدن لايزال في حالته الصلبة • وكمية الحرارة هـذه مقدار ثابت أيضاً ويتعلق بنوع المعدن وتدعى بالانتالبيا النوعية للتغير الآلوتروبي h_v ولها وحدات قياس مثيلتها نفسها للانصهار •

٧ ـ ٢ ـ ٥ ـ 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 :

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

حيث : ΔQ ـ مقدار الحرارة المختزنة •

c_p ـ الحرارة النوعية للمعدن والتي تتعلق بدرجة الحرارة (المعادلة 7.6) •

فاذا فرضنا أن درجة الحرارة تغيرت من T_1 إلـى T_2 فان 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 ألوتروبية عندها (وكما بيّنا آنفاً) تزداد كمية الحرارة المختزنة بمقدار ثابت دون أن تتغير درجة الحرارة • ولبيان ذلك نأخذ كمثال كمية الحرارة التي يمكن 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 و c_2 و c_3 و c_4 – القيم الوسطية للحرارة النوعية في مجالات الحرارة التي أُخذت 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 الآلوتروبية •

Q_{1539} – كمية حرارة **الانصهار** •

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

الحال في القضبان والاشرطـة والاسلاك فاننا نأخذ تمددها حسب البعد الأكبـر بعين الاعتبار أي تمددها الطولي ونسمي هذا التمدد التمدد الحراري الخطي (أو الطولي) للقطعة •فاذا ارتفعت درجة حرارة القطعـة من الصفر الى درجةالحرارة t فان طولها في هذه الدرجة يصبح مساوياً :

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

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 كتابةمعادلة التمدد الحجمي :

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t) \qquad (7.13)$$

حيث :

V_0 – الحجم في درجة الصفر المئوي •

α – عامل التمدد الحجمي ويساوي ثلاثة أضعاف عامـل التمدد الطولـي ($\alpha = 3\beta$) •

لاتصلح 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 هذاالتغير باحدى العلاقتين التاليتين :

$$\beta_t = \beta_0 + a t \qquad (7.14)$$

$$\beta_t = \beta_0 + a_1 t + a_2 t^2 \qquad (7.15)$$

حيث : β_0 – عامل التمدد الطولي في درجة الصفر المئوي •

a_1 و a_2 و a – ثوابت تتعلق بنوع المعدن •

أما في الخلائط المعدنية فان 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 :

$$\beta_{al.} = \beta_A X + \beta_B (1 - X) \qquad (7.16)$$

وأما في الخلائط ذات البنية المتجانسة وبخاصة المحاليل الصلبة منها فانه يمكن حساب عامل تمددها أيضا بالعلاقة السابقة نفسها ذلك لأن الفرق بين عامل التمدد الحقيقي وعامل التمدد المحسوب بهذه العلاقة نادراً مايتجاوز الـ ٥٪ ، أما الخلائط التي تحتوي على مركبات كيميائية أو معدنية فان عامل تمددها يختلف كل الاختلاف عما يمكن حسابه وفق نسب التركيز • وفي خلائط الحديد والفحم (ولأن هذه الخلائط ذات بنية غير متجانسة) فان عامل التمدد يختلف باختلاف نسبة الفحم ويمكن حسابه من العلاقة التالية :

$$\beta = (12{,}7 - 1{,}75 \cdot C\%) \cdot 10^{-6} \qquad (7.17)$$

وتجدر الإشارة هنا إلى نقطتين هامتين هما :

١ً – إن التغيرات التي تطرأ على البنية من انفصال صلب وتفاعل يوتكتويدي وتغير آلوتروبي كلها تؤثر في عامل التمدد بشكل مباشر ومفاجىء • فالانفصال الصلب

يعني ظهور طور جديد في البنية ، ويبدأ هذا الطور بظهـور بلورات صغيرةتبدأ بالنمو بين البلورات التي كانت موجودة سابقاً مما يسبب تغيراً في الحجم منجهة وتغيراً في مقدار الاجهادات الداخلية للقطعة من جهة أخرى ، وتتيجة هذهالعوامل قد تظهر على شكل تمدد أو تقلص أو قد لاتؤثر في حجم الخليطة •

٢ً ـ يزداد حجم المعدن بصفة عامة عند تحوله من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة ماعدا ثلاثـة معادن ينقص حجمها عنددرجة حرارة الانصهار وهي:الغاليوم والبزموت والانتيموان •

٧ ـ ٣ ـ ناقلية الكهرباء والحرارة عند المعادن والخلائط المعدنية :

نحن نعلم أن الالكترونات التي تقوم بنقـل القدرة الكهربائية في النواقـل المعدنية هي نفسها التي تقوم بنقـل القدرة الحرارية ، لهذا فان هناك علاقة وثيقة بين ناقلية المعدن (أو الخليطة المعدنية) للتيار الكهربائي وناقليتهما للحرارة • وعلى هذا الاساس فان الامور كافة التي تؤثر في ناقلية ناقل ما للتيـار الكهربائي (مثل إضافة عنصر سبائكي أو التشكيل ••• الخ) تؤثر أيضا في ناقليته للحرارة بالشكل نفسه وبالمقدار نفسه •

٧ ـ ٣ ـ ١ ـ ناقلية المعادن النقية للتيار الكهربائي :

من المعروف أن ناقلية التيار الكهربائي تزداد بازدياد مقطـع الناقـل F ونقصان طوله L ، كما أن هذه الناقلية تتعلق بنوعية الناقل نفسه أو طبيعته أو بالأحرى بالناقلية النوعية للمادة المصنوع منها هذا الناقل أي أن :

$$R = \rho \frac{L}{F} = \frac{1}{K} \cdot \frac{L}{F} \qquad (7.18)$$

حيث : ρ ـ المقاومة النوعية للمادة • K ـ 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 $١٠^{-٦}$ أوماً لذلك كثيراً ماتستعمل وحدةالميكروأوم سم حيثالميكروأوم= $١٠^{-٦}$ أوماً •

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 فان المقاومة النوعية العملية هذه تساوي ٤١٠ من المقاومة النوعية السابقة • والمقاومة النوعية للمعادن تعطى غالباً بجداول تحتوي على مقاومة ١ سم^{٣} 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 ـ أي أن المقاومة النوعية المقيسة في البلورة الواحدة باتجاه المحور الرئيس لهذه البلورة مثلاً تختلف عن تلك المقيسة بالاتجاه العمودي على هذا المحور (طبعاً ما عدا البلورات ذات الهياكل الشبكية المكعبة)، لهذا فان 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 ـ ٣ ـ ٢ ـ تأثير الحرارة في ناقلية المعادن للتيار الكهربائي :

إن المقاومة النوعية التي تعطيها 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 :

$$a = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_{100} - R_0}{100 - 0} \qquad (7\cdot19)$$

غير أنه بارتفاع درجة الحرارة تتغير مقاييس الناقل نفسه وأبعاده نتيجة للتمدد الحراري ، فاذا أهملنا هذا التمدد فانه يمكن أن نكتب العلاقة على الشكل التالي:

$$a = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_{100} - \rho_0}{100} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta t} \qquad (7\cdot20)$$

وعندها تكون المقاومة النوعية في درجة حرارة ما هي :

$$\rho_t = \rho_0 (1 + a\,t) \qquad (7\cdot21)$$

ومقاومة الناقل الكلية هي :

$$R_t = R_0 (1 + a\,t) \qquad (7\cdot22)$$

غير أن العامل الحراري هذا هو نفسه يتغير بتغير درجة الحرارة . لذلك فان العلاقة السابقة لا تصلح إلا في المجالات الحرارية الصغيرة ـ أي على الاكثر ضمن ١٠٠° مئوية ولحساب المقاومة في درجة حرارة مرتفعة بشكل أدق يجب استعمال العلاقة التالية :

$$R_t = R_0 (1 + a_1 t + a_2 t^2) \qquad (7.23)$$

إن المعادن الفرومغناطيسية (مثل الحديد والنيكل والكوبالت) تتصرف تصرفا خاصا من حيث مقاومتها النوعية حيث أنه بارتفاع درجة الحرارة في بادىء الأمر تزداد مقاومتها النوعية بشكل عادي إلا أنها عندما تقترب من درجة التغير المغناطيسي فان 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 فانه لا يؤثر في تغيير المقاومة النوعية ــ أي لا يشكل انكساراً في منحني هذه المقاومة بتابعية درجة الحرارة الأمر الذي يؤكد لنا أن المقاومة الكهربائية لا تتعلق بالشكل البلوري بل بالمدارات الالكترونية للذرة والالكترونات الحرة للمعدن •

وعند انصهار المعدن تتغير ناقليته للتيار الكهربائي بشكل مفاجىء وبشكل يشبه تغير الحجم النوعي الذي يرافق الانصهار • وأكثر المعادن يزداد حجمها النوعي ومقاومتها الكهربائية ماعدا الغاليوم والبزموت والأنتيموان فينقص كل" من حجمها النوعي ومقاومتها • وازدياد المقاومة عند الانصهار بالنسبة لأكثر المعادن يعادل تقريباً ١٠٠٪ ــ أي أن مقاومتها تتضاعف عند تحولها من الحالة الصلبة الى 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 ـ ٣ ـ ٣ ـ تأثير التشكيل والتطرية في ناقلية المعادن للتيار الكهربائي :

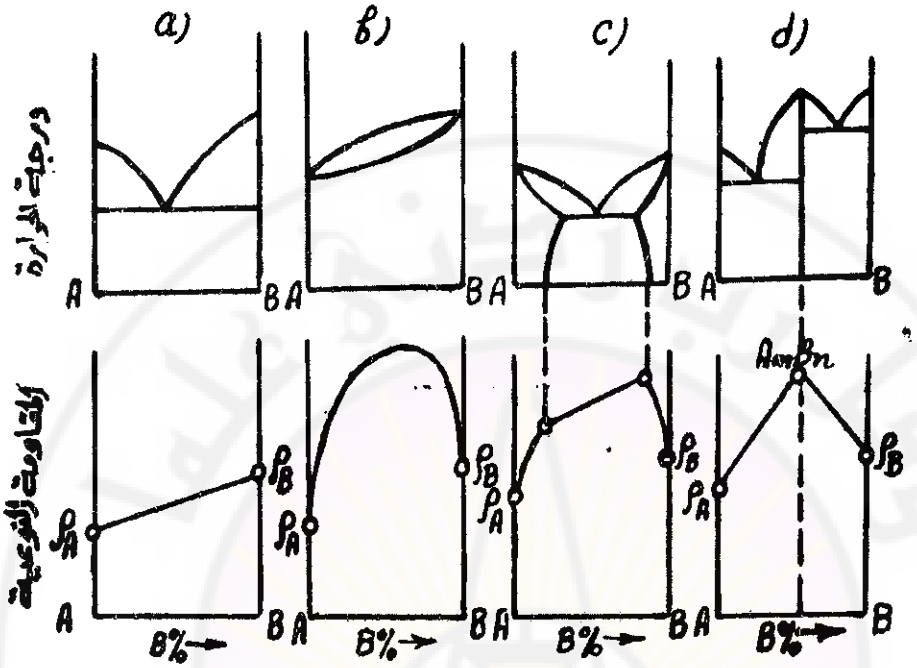
من المعروف أن التشكيل البارد يغير من الحجم النوعي للمعدن ، لهـذا فانه يؤثر في مقاومته النوعية أيضا ، وبنقصان الحجم النوعي تقل المقاومة النوعية ـ أي أن المقاومة النوعية لقطعة معدنية مسكوبة تقل بعد تشكيلها على البارد غير أنه اذا زادت نسبة التشكيل عن ٧٠٪ فان المقاومة النوعية تزداد قليلاً .

أما بالنسبة للاسلاك المسحوبة على البارد فان مقاومتها النوعية تنخفض من جديد عند تطريتها . والمقاومة النوعية هذه تصل الى حدٍ أدنى عند شروط تطرية معينة ـ أي بالتطرية في درجة حرارة معينة ولفترة زمنية محددة . وشروط الحصول على مقاومة نوعية صغيرة تتفق مع شروط التطرية نفسها ـ أي أنه كلما ارتفعت درجة الحرارة احتجنا لفترة زمنية أقصر وبالعكس كلما انخفضت درجة الحرارة أصبح من الضروري زيادة فترة الإحماء . فمثلاً تنخفض مقاومة سلك من النحاس مسحوب على البارد الى الحد الادنى باحمائه 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 النسج البلورية المختلفة، إلا أن هذه التغيرات ليست ذات قيمة عملية .

٧ ـ ٣ ـ ٤ ـ 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 . ويُبيِّن الشكل



الشكل (٧ ــ ١) : تباين علاقة المقاومة النوعية للخليطة بتركيزها من مخطط توازن الى آخر .

(٧ ــ ١) كيف تتغير علاقة المقاومة النوعية للخليطة بتركيزها من مخطط إلى آخر.

١ً ــ ففي الخلائط ذات البنية الصلبة غير المتجانسة ــ أي التي تحتوي على كلٍ من المعدنين على شكل أطوار مستقلة (مزيج ميكانيكي) نلاحظ أن المقاومة النوعية للخليطة تتغير وفق خط مستقيم يصل بين مقاومتي المعدنين (انظر الشكل ٧ ــ ١ a)، وهذا يعني أن المقاومة النوعية لأي عينة من هذه المجموعة يمكن حسابها باستعمال قاعدة المزج والتي أصبح شكلها مألوفا :

$$\rho_{al.} = \rho_A x + \rho_B (1 - x) \qquad (7.24.)$$

وبالطبع فان القيمة التي نحصل عليها هي قيمة تقريبية لأن الخط الحاصل

ليس مستقيما تماما كما يبدو لنا من الشكل ، أما اذا أردنا حساب المقاومة النوعية بدقة فاننا نلجأ لقاعدة المزيج اللوغاريتمية والتي أثبتت صحتها بالتجارب وهي من الشكل التالي :

$$\log \rho_{al.} = x \log \rho_A + (1 - x) \log \rho_B \qquad (7.24)$$

٢ً ــ أما في الخلائط التي يكون الذوبان فيها مطلقا في الحالة الصلبة ــ أي التي تتشكل فيها محاليل صلبة فان المقاومة النوعية تكون أكبر بكثير من المقاومة النوعية التي يمكن حسابها من مكونات المحلول الصلب وفق قاعدة المزج (انظر الشكل ٧ ــ ١ b)• فمن هذا الشكل نلاحظ أن المقاومة النوعية تتغير بتغير تركيز الخليطة على منحن ذي نهاية عظمى • من هنا نستنتج أن المقاومة النوعية تزداد بشكل كبير عند تشكل المحاليل الصلبة •

٣ً ــ وفي الخلائط التي يكون الذوبان فيها محدودا في الحالة الصلبة فان المقاومة النوعية تتغير بتغير تركيز الخليطة على منحن فقط في المجال الذي يوافق تشكل محلول صلب أحادي الطور (انظر الشكل ٧ ــ ١ c)• أما في مجال تركيز الخليطة الذي يوافق تشكل مزيج ميكانيكي لمحلولين صلبين فان تغير المقاومة النوعية يكون وفق خط مستقيم •

٤ً ــ وفي الخلائط التي يتشكل فيها مركب كيميائي من أجل نسبة تركيز محددة فاننا نلاحظ أن تركيز المركب الكيميائي يوافق نهاية عظمى(أو صغرى) على منحني تغيرالمقاومة النوعية بتغير تركيز الخليطة (في حالتنا هذه نلاحظ أن النهاية العظمى هي انكسار مستقيم تغير المقاومة النوعية ــ انظر الشكل ٧ ــ١ d)•

إن لارتفاع درجة حرارة الخليطة تأثيرا في مقاومتها النوعية يشبه تأثير الحرارة في المقاومة النوعية للمعادن النقية ــ أي أن المقاومة النوعية للخليطة تزداد

بارتفاع درجة حرارتها وحسب عامل ثابت يتعلق بنوع الخليطة وتركيزها • ويبقى منحني المقاومة النوعية للمجموعة الخلائطية لمعدنين محافظا على شكله تقريبا بارتفاع درجة الحرارة إلا أنه ينزلق قليلاً نحو الأعلى •

٧ ـ ٣ ـ ٥ ـ ناقلية المعادن والخلائط المعدنية للحرارة :

إن كمية الحرارة التي تمر عبر قضيب معدني مساحة مقطعه F وخلال فترة من الزمن τ هي :

$$Q = \lambda \cdot F \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \tau \qquad (7.25)$$

حيث :

Q ـ كمية الحرارة ووحدة قياسها (cal أو J) .

dT ـ مقدار الفرق في درجة الحرارة على طول جزءٍ من القضيب مقداره dx .

λ ـ ثابت يتعلق بنوع المعدن ويُسمى الناقلية الحرارية للمعدن ووحدة قياسها [$\frac{cal}{cm \cdot {}^{\circ}C \cdot sec.}$ ـ أو $\frac{W}{cm \cdot {}^{\circ}C}$] .

لقد ذكرنا آنفاً أن هناك علاقة وثيقة بين ناقلية المعدن للتيار الكهربائي وناقليته للحرارة ، لهذا فان 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 : ($\frac{\lambda}{K} = const$) • كما وجد أن هذه النسبة لا تختلف من معدنٍ لآخر إلا بمقدار بسيط جداً يمكن إهماله حيث :

$$\frac{\lambda}{K} = (650 - 700) \frac{W}{cm^2 \cdot {}^{\circ}C \cdot \Omega} \qquad (7.26)$$

غير أن تغير ناقلية الحرارة بارتفاع درجة الحرارة أقل من تغير ناقلية الكهرباء

مما أوجب البحث عن علاقة أخرى بين هذين العاملين بحيث نأخذ تغير درجة الحرارة بعين الاعتبار وتكون أكثر صلاحية من العلاقة السابقة ، وتستعمل الآن النسبة التالية :

$$\frac{\lambda}{KT} = 2{,}45 \cdot 10^{-8} \left(\frac{V}{^{\circ}C}\right)^2 \qquad (7 \cdot 27)$$

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 . فالبلورات ذات الهياكل الشبكية المكعبة تختلف ناقليتها للحرارة باتجاه المحور الرئيس عنها بالاتجاهات الأخرى . كما أن المعادن الفيرومغناطيسية 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 والأنتيموان 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 ـ ٤ ـ الخواص الكهروحرارية للمعادن والخلائط المعدنية :

يمكن إيجاز الخواص الكهروحرارية للمعادن والخلائط المعدنية في ثلاث ظواهر أساسية وذلك كمايلي :

١ً ــ ظاهرة سيباك (Seeback) : إذا وصلنا سلكين من معدنين مختلفين على شكل دارة مغلقة وجعلنا فرقاً في درجة الحـرارة بـين نقطتي الوصل الأولى والثانية فان توتراً أو قدرة محركة كهربائية سوف تنشأ في هذه الدارة • ومقدار هذا التوتر يتعلق بالفرق بين درجتي حرارة نهايتي السلكين حيث :

$$E = a + b\,t + c\,t^2 \qquad (7.28)$$

حيث :

a و b و c ــ ثوابت تتعلق بنوع المعدنين المستعملين •

t ــ الفرق بين درجتي حرارة نهايتي الوصل •

E ــ التوتر الناتج مقدراً بالميلي فولت •

كثيراً ما نستفيد من هذه الخاصة في قياس درجات الحرارة وصنع مقاييـس للحرارة تعتمد على هذه الظاهرة وذلك بلحم شريطين من معدنين مختلفين ثم وصل نهايتيهما الحرتين ببعض عن طريق مقياس فولت دقيق • وبوضع النهايـة الملحومة في وسط درجة حرارته أكبر من الدرجة العادية فان مقياس الفولت سيشير الى توتر ما يتعلق مقداره بدرجة الحرارة التي وضعت فيها النهاية الملحومة • ويُسمى 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 الى ١٠٠° مئوية • وتدرج القيم الناتجة في جداول يمكـن استعمالها في مقاييس الحرارة التي تعتمد على هذا المبدأ حيث يكون التوتر الناتـج 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 ــ أي بمقارنتها بالبلاتين • وللحصول على فكرة

واضحة عن تغير القوة الحرارية لخليطة ما بتغير نسب العناصر الداخلة في تركيبها علينا أن نتبع طريقة شبيهة بتلك التي اتبعناها عند إنشاء مخطط توازن الخليطة ــ أي بأخذ عدد من العينات تتراوح في تركيزها بين ١٠٠٪ للمعدن الأول وحتى ١٠٠٪ للمعدن الآخر ويتم قياس القوة الحرارية لكل عينة على حدة ثم تجمع النتائج في جدول أو في مخطط شبيه بمخطط التوازن •

٢ً ــ ظاهرة بلتير (Peltier) : اذا مر تيار كهربائي في قطعتين معدنيتين ملحومتين فانه بالاضافة لحرارة جول تنطلق من مكان اللحام كمية من الحرارة تتعلق بشدة التيار والزمن حسب العلاقة التالية :

$$Q_p = \pi \cdot I \cdot \tau \qquad (7.29)$$

حيث :

I ــ شدة التيار الكهربائي المار بالقطعتين الملحومتين •

τ ــ زمن مرور التيار •

Q_p ــ كمية حرارة بلتير والتي قد تكون موجبة أو سالبة ــ أي التي قد تعمل على تسخين الوسط المحيط بها أو تبريده وذلك حسب اتجاه التيار الكهربائي •

٣ً ــ 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 ــ ٥ ــ الخواص المغناطيسية للمعادن والخلائط المعدنية :

تصنف المعادن والخلائط المعدنيــة حسب تأثير الساحة المغناطيسية فيها الى نوعــين :

آ ــ 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 هــذا القضيــب يحاول أن يأخذ وضعاً عمودياً على اتجاه خطوط الساحة المغناطيسية •

ب ــ بارامغناطيسية (Paramagnetic) : وهي المعادن والخلائط المعدنية التي تعمل على تجميع (أو تكثيف) خطوط الساحة المغناطيسية • فاذا وضعنا قضيبــاً من معدن بارامغناطيسي في ساحة مغناطيسيه فان هذا القضيب يعمل دائماً عــلى أن يأخذ اتجاهاً موازياً لخطوط تلك الساحة • ويُستعمل المعياران التاليان للتمييــز بين المعادن الديامغناطيسية والمعادن البارامغناطيسية :

١ً ــ قابلية النفوذ المغناطيسيه (μ) : فاذا كانت قابلية النفوذ المغناطيسية لمعدن ما أقل من 1 (أي أن : $\mu < 1$) فان هذا المعدن ديامغناطيسي ، وإذا كانــت $\mu > 1$ فان المعدن يتمتع بخواص بارامغناطيسية •

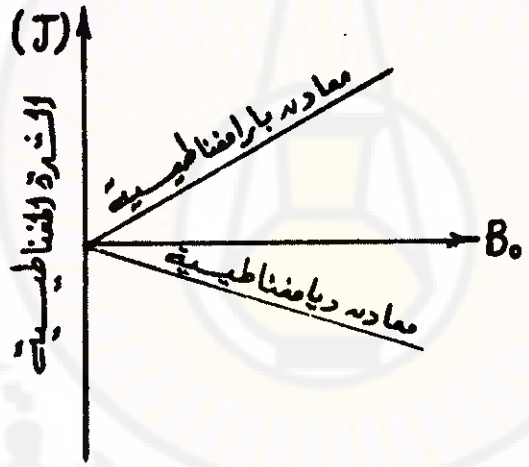
٢ً ــ قابلية التمغنط (χ) : فاذا كانت قابلية التمغنط لمعدن ما أقل مــن الصفر (أي أن $\chi < 0$) فان هذا المعدن ديامغناطيسي ، وإذا كانت ($\chi > 0$) فان المعدن يتمتع بخواص بارامغناطيسية • وقابلية التمغنط χ هي عامل التناسب في العلاقة التالية (انظر الشكل ٧ ــ ٢) •

$$J = \chi B_0 \qquad (7.30)$$

حيث : J ـ الشدة المغناطيسية •

B_0 ـ التحريض المغناطيسي •

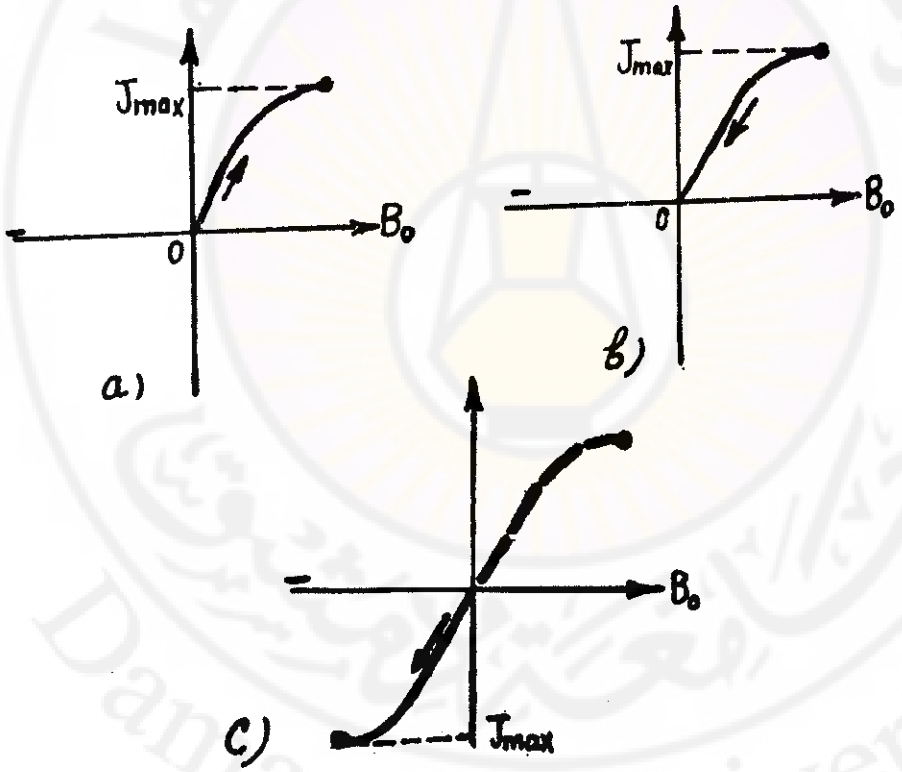
إن أكثر المعادن والخلائط المعدنية ذات قابلية نفوذ مغناطيسية قريبة جدا من الواحد (أي أن μ لا تزيد كثيراً عن الواحد) مما يجعل تأثرها بالساحة المغناطيسية ضعيفاً ، لهذا فان قيمة خواصها المغناطيسية من الناحية العملية ليست ذات أهمية ما عدا ثلاثة معادن هي الحديد والنيكل والكوبالت حيث تتمتع هذه المعادن الثلاثة بخواص بارامغناطيسية قوية أي أن: ($\mu >> 1$ و $\chi >> 0$) لهذه المعادن •وتسمى



الشكل (٧ ـ ٢) : العلاقة بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي للمعادن البارامغناطيسية والديامغناطيسية .

هذه المعادن الفرومغناطيسية • وتبقى علاقة التناسب بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي موجودة في هذه الحالة إلا أن هذه العلاقة ليست خطية كما لبقية المعادن وإنما العلاقة هي من النوع المنحني • ولبيان نوعية هذه العلاقة لا بد لنا من أن نذكر أن المعادن الفيرومغناطيسية تقسم الى فئتين :

آ ــ المعادن اللينة مغناطيسيا : والمقصود باللينونة المغناطيسية هو أن يكون المعدن ذا قابلية جيدة للمغنطة ويتخلى عن هذه المغنطة بسهولة أيضا وبدون أن تكون القدرة الضائعة كبيرة • ويُبيِّن الشكل (٧ ــ ٣) نوعية العلاقة بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي في المعادن اللينة مغناطيسيا • فمن الشكل (٧ ــ ٣ a)) نلاحظ أن الشدة المغناطيسية تزداد بازدياد التحريض المغناطيسي لتصل الى حدٍ معين لا تزداد بعده ، ويُسمى حد الاشباع • ولكن الشكل (٧ ــ ٣ b)) يُبيِّن أن الشدة المغناطيسية تزول عند زوال التحريض المغناطيسي حتى تعود الى الصفر • وإذا تم التأثير في المعدن اللين مغناطيسيا بتحريض مغناطيسي



الشكل (٧ ــ ٣) : العلاقة بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي عند المعادن اللينة مغناطيسيا .

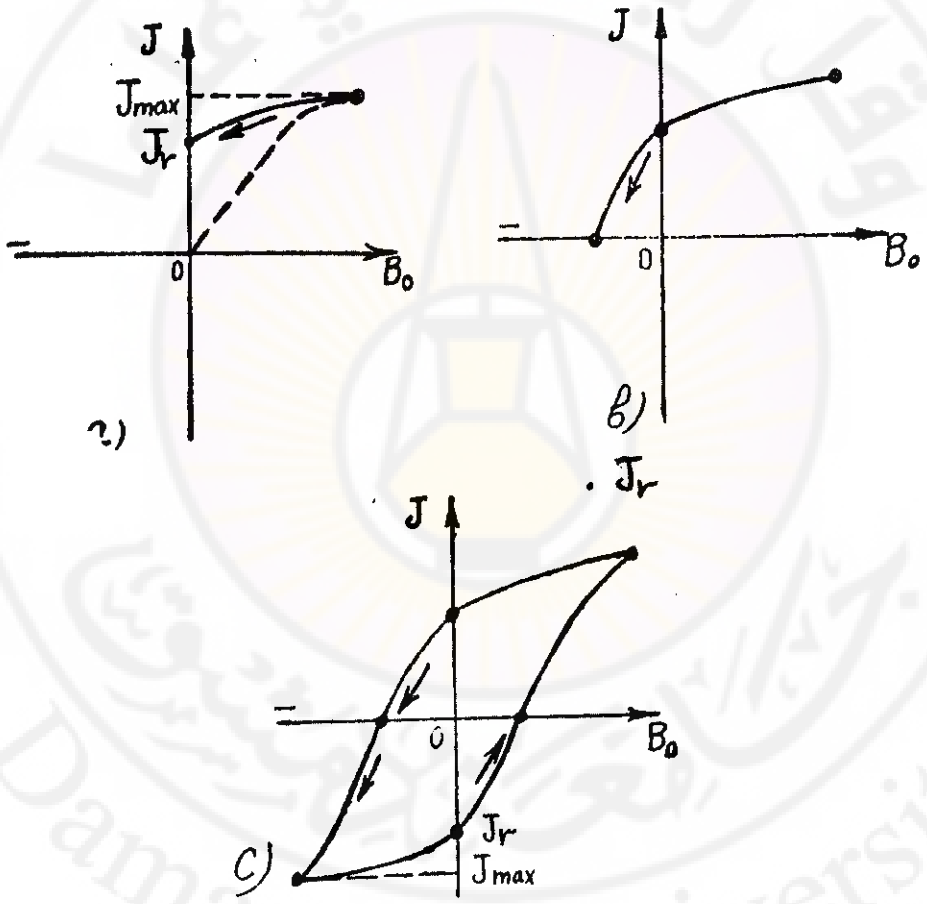
معاكس للتحريض الأول فان الشدة المغناطيسية تزداد هنا أيضا ولكن باتجاه يختلف عن الاتجاه السابق ولتصل الى قيمة عظمى لا تزداد بعدها مهما ازداد التحريض • من هنا نلاحظ أن المعادن اللينة مغناطيسيا تتأثر بشكل جيد بالمجال المغناطيسي الموجودة به ولكن دون أن يترك بها أي خلفية مغناطيسية ــ أي أن مايسمى مجال الهسترة 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 ليّن مغناطيسيا متعذرا ، ويستعمل بدلاً منه بعض أنواع الفولاذ الطري التي تسمى عادة أنواع الحديد اللين • وعلى الرغم من كون الحديد النقي من أجود ما يمكن استعماله في الاغراض 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 بالاضافة الى مجال الهسترة الصغير جدا (أو المعدوم) أن تكون قابلية نفوذها المغناطيسية كبيرة وذلك كي تتأثر بالساحة المغناطيسية وهناك كثير من الخلائط اللينة مغناطيسياً مثل خليطة : الحديد ــ النيكل، الحديد ــ النيكل ــ الكروم ، الحديد ــ الموليبدينيوم وغيرها •

ب ــ المعادن القاسية مغناطيسياً : وهي المعادن القادرة على الاحتفاظ بمغناطيستها 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 بمغناطيستها • ويبين الشكل (٧ ــ ٤) علاقة الشدة المغناطيسية بالتحريض المغناطيسي لهذه المعادن من جهة

ومامعنى احتفاظ هذه المعادن بمغناطيسيتها بعد زوال التحريض المغناطيسي من جهة أخرى • فعلى الشكل (٧ ــ ٤ a) نلاحظ أن الشدة المغناطيسية تزداد بازدياد التحريض المغناطيسي حتى تصل إلى حد الاشباع J_{max} وعند زوال الساحة المغناطيسية المؤثرة تدريجياً لتصل إلى الصفر فان الشدة المغناطيسية لاتتلاشى بل تبقى بعض المغناطيسية الباقية (J_r) . ولازالة هذه المغناطيسية الباقية يجب



الشكل (٧ ــ ٤) : العلاقة بين الشدة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي عند المعادن القاسية مغناطيسياً .

وضع المعدن تحت تأثير تحريض مغناطيسي معاكس بالاتجاه للتحريض الأول (انظر الشكل ٧ ــ ٤ (b)) • ومن الشكل (٧ ــ ٤ (c)) نلاحظ أنه إذا ازدادت قيم التحريض المغناطيسي العكسي فان 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 فان هناك مغناطيسية باقية ($-J_r$)، ولإزالتها 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 مايعرف من المعادن القاسية مغناطيسياً هو فلزالحديد المسمى المغناتيت والذي يدعى أيضاً بالحجر المغناطيسي • أما كمغناطيس دائم صناعي فأول مااستعمل هو الفولاذ المحتوي على نحو ١٪ كربوناً والمجراة له عملية سقاية • ومنذ عام ١٨٨٠ بدأ العلماء والباحثون العلميون في هذاالمجال بتطوير صناعة المغناطيس الدائم فابتكروا الفولاذ المحتوي على ٦٪ تنجستيناً ثم الفولاذ المحتوي على ٣٥٪ كروماً • بعد ذلك تم ابتكار عدد من الخلائط الأرخص بكثير من الفولاذ الكرومي السابق والاكثر منه استطاعة وأهم هذه الخلائط هي خلائط الحديد مع النيكل والكوبالت والألمنيوم أو الحديد والنيكل والألمنيوم ••• إلخ •

٧ ــ ٦ ــ انتشار الذرات في المعادن والخلائط المعدنية :

نحن نعلم أن ذرات المعدن غير مستقرة في أماكن توضعها في عقد الهياكل

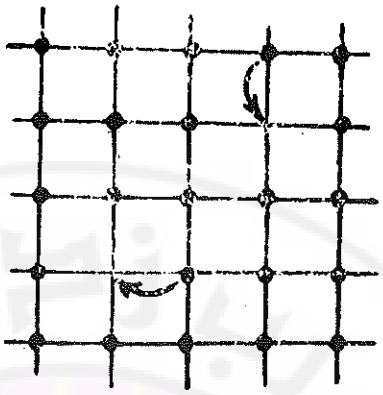
الشبكية حتى في درجة الحرارة العادية والسالبة وإنما هي في حركة اهتزازيـــةدائمة حـــول مكان توضعها في هذه العقد • ويتعلق كل" من تردد الاهتزاز وسعته بدرجة الحرارة • فعند ارتفاع درجة حرارة الذرات تزداد سعة الاهتزاز وينخفض التردد في الوقت نفسه ولاتنعدم الحركة الاهتزازيـــة للذرات إلا في درجة الصفرالمطلق• وتتراوح قيم تردد الاهتزاز بـ ($\nu = 10^{12} \div 10^{13}$ Hz) ، وأما سعة الاهتزاز فهي بحدود ١ر• من طول ضلع الهيكل الشبكي • وتعيَّن القدرة الاهتزازية للـــذرات من المعادلة التالية :

$$W = 3\,k\,T \qquad (7.31)$$

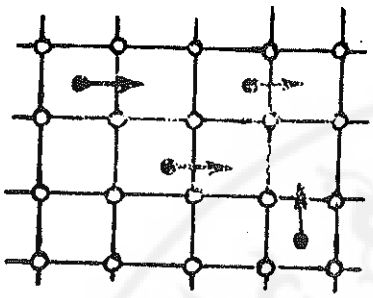
حيث : k ـ ثابت بولتسمان ويساوي : $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/sec .

T ـ درجة الحرارة المطلقة •

والقدرة الاهتزازيـــة هذه ليست متساوية في جميع الذرات وإنما تختلفمن 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 • فاذا اكتسبت الذرة قدرة إضافية منالذرات المجاورة فان سعة الاهتزاز تزداد ويمكن للذرة أن تصبح في وضع غير مستقر • وعند قيمة معينة لسعة الاهتزاز يمكن لهذه الذرة أن تنفصل عن جاراتها منالذرات الأخرى وتنتقل إلى عقـــدة أخرى ولتستقر بين ذرات أخرى • وتفقد الذرة جزءاً من قدرتها أثناء انتقالها وتعطيها لذرات أخرى حتى إذا وصلت إلى مكانها الجديـــد 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 • ويُسمى هذا الانتقال التدريجي للذرة الانتشار • ويجب أن نميز هنا بين حالتين للانتشار هما :



لشكل (٧ ــ ٥) : انتشار الذرات عبر عقد الهياكل الشبكية في المحاليل الصلبة التبادلية أو المعادن النقية .



الشكل (٧ ــ ٦) : انتشار الذرات الغريبة في المركبات التداخلية

آ ــ يمكن أن يتم الانتشار عبر عقد الهياكل الشبكية الأساسية ــ أي أن الذرة تنتقل من عقدة موجودة بها إلى عقدة فارغة (انظر الشكل ٧ ــ 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 ــ 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 ــ ٦) .

تدعى القدرة اللازمة لانتقال الذرة من مجال توازنها إلى مجال آخر بالقدرة التنشيطية (أو القدرة الفعالة). وكلما كانت القدر النشطة لمعدن ما كبيرة كان احتمال انتقال الذرة عن عقدة إلى أخرى أصغر والعكس صحيح . ولقد بيّنا سابقاً (الفصل الثاني) العلاقة بين تركيز الثقوب (أي النسبة بين العقد الفارغة والعقد الكلية في الهيكل) بكلٍ من الطاقة التنشيطية ودرجة الحرارة وذلك من خلال العلاقة التالية :

$$\frac{n}{N} \simeq e^{-E/KT} \qquad (7.32)$$

أما سرعة الانتشار فيمكن التعبير عنها من خلال عامل الانتشار D والذي يُعرَّف 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 :

$$D = A\, e^{-E/KT} \qquad (7.33)$$

حيث : A ـ ثابت التناسب ويتعلق بنوع المعدن ويتناسب هذا الثابت طرداً 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 اجراء المعالجة الحرارية المناسبة • وتستخدم هذه الظاهرة في احدى 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 وتتشكل الوصلة اللحامية دون اللجوء لعملية الصهر الموضعي للقطعتين أو تطبيق قوى ضغط كبيرة عليهما •

* * *

الفصل الثامن

الخواص الميكانيكية للمعادن والخلائط المعدنية واختباراتها

إن المـواد المستعملة في الانشاءات الهندسية سواءً أكانت معدنيـة أم غير معدنية يجب أن تتمتع بعـدد من الخواص المختلفة والمتفاوتة بحيث نستطيع اختيار المادة المناسبة لكل غرضٍ من الأغراض ، وبحيث تتناسب خواصها مع العمل الذي يجب أن تؤديه • فعند اختيار مادة لصنع قطعة من آلة ما فان 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 المـادة عند تطبيق قوى معينة عليها قابلة لتغيير شكلها وإلا مااستطعنا اعطاءها الشـكل المناسب أثناء تصنيعها • وهكذا فان الخواص الميكانيكية هي تلك التغيرات التي تبديها المادة بتأثير القوى المؤثرة فيها أثناء التشكيل أو التشغيل أو التحميل بأحمال مختلفة •

واختبارات الخواص الميكانيكية يمكن تصنيفها بصورة عامة في فئتين :

الفئة الاولى : هي تلك الاختبارات التي نحصل منها على وحدات قياسية تميز المادة المختبرة ويمكن في أغلب الأحيان الاستفادة من هذه الوحدات في الحسابات التصميمية •

الفئة الثانية : هي تلك الاختبارات التي غالباً ماتكون 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 ، وتسمى 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 :

١ـ **الاختبارات الستاتيكية :** وتكون القوى المؤثرة المستعملة في هذه الاختبارات إما ثابتة أو متغيرة ببطء شديد .

٢ـ **الاختبارات الديناميكية :** وتكون القوى المؤثرة في عينات الاختبار في هذه المجموعة هي قوى متغيرة باستمرار أو أن تطبيق القوة يتم بسرعة كبيرة .

٣ ـ **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 ، الفتل ، القص وقياس القساوة (الصلادة السطحية) .

٨ ـ ١ ـ اختبار الشـد :

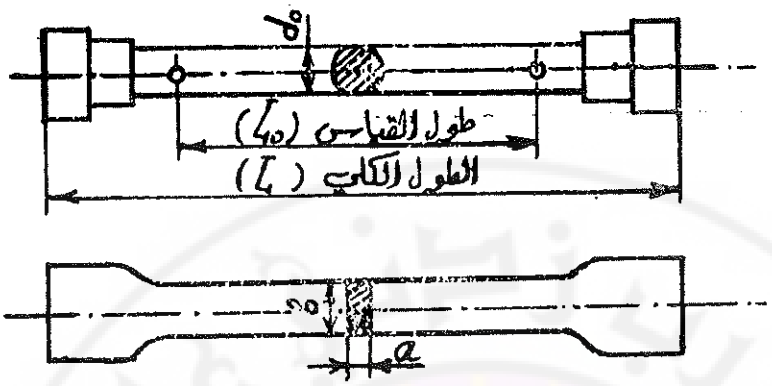
يُعرف اختبار الشد على أنه : إخضاع عينة ذات أبعاد معروفة الى حمـل شد ستاتيكي أحادي المحور مع مراقبة سلوك العينة من لحظـة بدء تطبيق الحمل وحتى الانكسار . ويعد اختبار الشد من أهم الاختبـارات الميكانيكية للقطـع المعدنية والوصلات بسائر أنواعها وذلك لكثرة الوحدات القياسية المستنتجة مـن هذا الاختبار وأهمية هذه الوحدات في الحسابات التصميمية إضافة لاعتماد جزء كبير من هذه الوحدات كمواصفات قياسية في تحديد جودة المعدن أو الوصلة .

٨ ـ ١ ـ ١ ـ اختيار العينات :

تستخدم لاختبار الشد عينات" نظامية اتفق على شكلها وأبعادها دولياً ذلك لأن الدقـة في اختيار عينة الشد واعدادها بشكل صحيح يؤثران وبشكل واضح في دقة النتائج التي نحصل عليها من هذا الاختبار . ويجب أن نعتمد في اختيـار عينة الشد على ثلاثة أسس رئيسة وهي :

١" ـ يجب أن تكون العينة معدة من المادة نفسها المراد اختبارهاوأن تكون سطوحها نظيفة وناعمة وذلك حتى لاتلعب الخدوش أو الحزوز أو العيوبالسطحية الأخرى دوراً في النتائج العملية التي نحصل عليها .

٢" ـ يجب أن لاتحقق عينة الشد وجـود حالة الاجهاد السطحي أو الانفعال السطحي أثناء الاختبار .



الشكل (٨ ــ ١) : عينات اختبار الشد

٣ً ــ إذا لم تتوافر الآلة التي نستطيع أن نختبر عليها عينات نظامية فانه يتم اختبار عينات وفق المواصفات المعتمدة وذلك حتى يكون هناك إمكان للمقارنة .

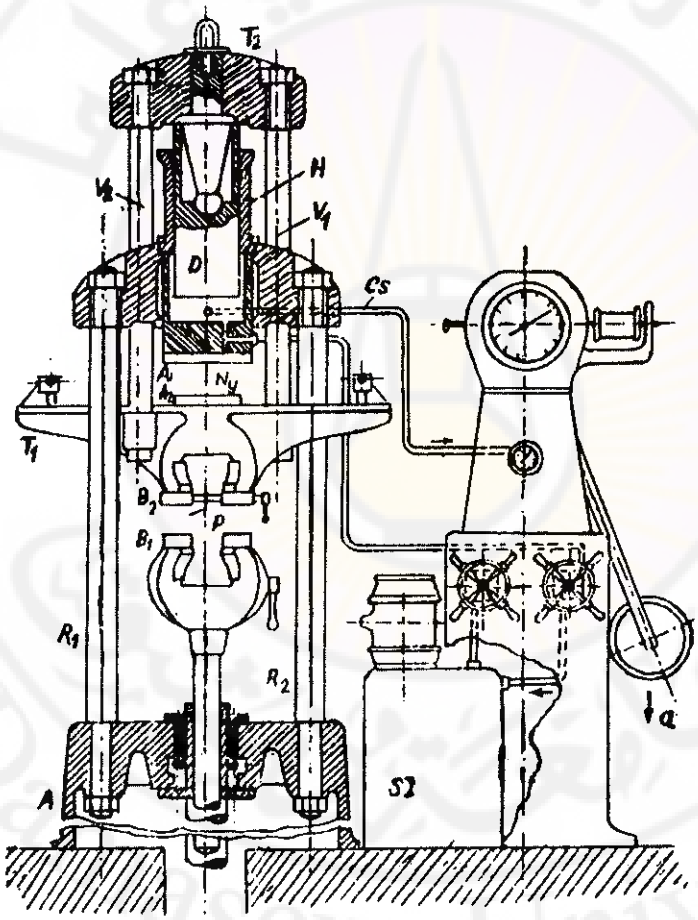
ويوضح الشكل (٨ ــ ١) الشكل العام للعينات المستخدمة في تجربة الشد . وكما هو واضح من الشكل فان مقطع العينة يكون إما دائرياً أو مستطيلاً أو مربعاً .

٨ ــ ١ ــ ٢ ــ الآلات المستخدمة في اختبار الشد :

تتنوع الآلات المستعملة في اختبار الشد بشكلها وحجمها ، فمنها الصغيرة التي لاتزيد استطاعتها عن بضعة كيلو غرامات والمتوسطة (بضعة أطنان) والكبيرة التي تبلغ استطاعتها عشرات الاطنان بل مئات . وغالباً ماتكون الآلات الصغيرة ميكانيكية ، أما المتوسطة والكبيرة فهي على الاغلب هيدروليكية التحميل . والآلات الصغيرة والكبيرة غالبا ماتستخدم في أغراض خاصة ، أما الآلات الاكثر استعمالاً وعلى نطاق واسع فهي الآلات المتوسطة .

ويبيّن الشكل (٨ ــ ٢) رسما توضيحيا لاحدى هذه الآلات والتي تتألف من رأسين زُوّد كل" منهما بقبض لتثبيت رأس العينة أحدهما B_1 ثابت مع

جسم الآلة (يمكن تعييره يدويا ثم تثبيته) والآخر B_2 متحرك لكونه مثبتا مع المكبس المتحرك بوساطة المحاور الدليلة V_1 و V_2 والقاعدة T_1 . فعند ضخ الزيت بوساطة 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 ــ ٢) : الة 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 بوساطة مقياس ضغط يقيس ضغط السائل في اسطوانةالمكبس عن طريق الانبوب CS ،كما تقاس في هذه الأثناء استطالة العينة .

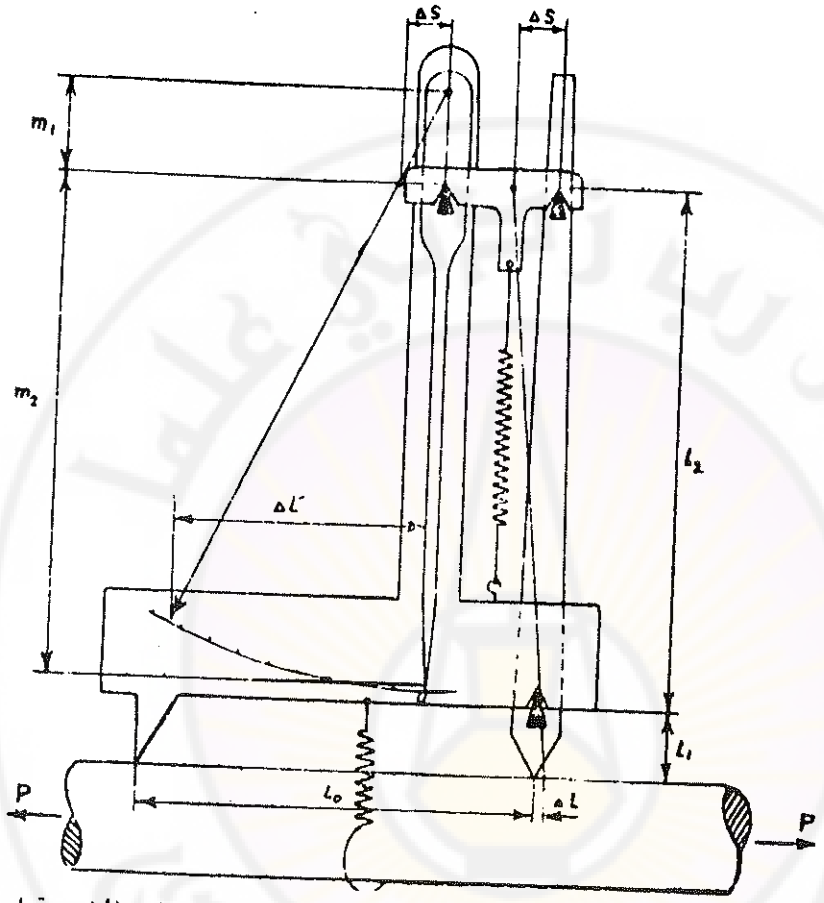
٨ ــ ١ ــ ٣ ــ قياس الانفعال :

يتم قياس الانفعال عن طريق قياس الاستطالة . ويمكن قياس الاستطالة باستخدام إحدى الطرق الأربع التالية :

١ــ الطريقة البسيطة : تؤخذ العينة بعد انكسارها ويوضع جزءاها الى جانب بعضهما ويقاس طول العينة ، فالفرق الحاصل بين طول العينة (بعد الانكسار) وطولها الاصلي (أي قبل الاختبار) هو الاستطالة الكلية للعينة . وتعد هذه الطريقة أقل طرق قياس الانفعال دقة .

٢ــ الطريقة الميكانيكية : تستخدم لقياس الانفعال بالطريقة الميكانيكية أجهزة قياس كثيرة ومتنوعة تسمى التنزوميترات ، 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 .

يثبت 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 المقـ



الشكل (٨ ــ ٣) : جهاز هوغنبرغر لقياس الانفعـال في العينات المختبرة على الشد.

وبما أن هذا الرأس متصل بذراع طويل فان أي انتقال مقداره ΔL في أسفل
انتقال للنهاية الأخرى لهذا الذراع بمقدار ΔS
(انظر الشكل ٨ ــ ٣) ، ثم يكبر هذا الانتقال
قة نفسها وبوساطة ابرة المؤشر ، أي أن :

$$\frac{\Delta S}{\Delta L} = \frac{L_2}{L_1} \Longrightarrow \Delta S = \Delta L \frac{L_2}{L_1}$$

$$\frac{\triangle L'}{\triangle S} = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \Longrightarrow \triangle L' = \triangle S \frac{m_1 + m_2}{m_1} \qquad (8.2)$$

$$\frac{\triangle L'}{\triangle L} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} \qquad (8.3)$$

ولا بد هنا من التنويه الى أن الخطأ النسبي الحاصل بهذه الطريقة يكـون كبيراً في بعض الأحيان اذا ماقورن بطرق أخرى أكثر دقـة وسببه الانزلاق الذي يحدث أثناء التجربة ، وعلى الرغم من كل هذا فان هذا الجهاز يستخدم في قيـاس الانفعالات الناتجة عن التحميل الستاتيكي ، أما في قياس الانفعالات الديناميكية فهو نادر الاستخدام .

٣ـ الطريقة الكهربائية : تستعمل في القياسات الدقيقة للاستطالة أجهـزة قياس كهربائية ، وأكثر هذه المقاييس استخداما ذلك المسمى الطابع اللاصق وهو سلك معدني دقيق مثبت على صفيحة ورقية بشكل متعرج ، والشكل (٨ ــ ٤) يُبيِّن بعض أشكال هذه الطوابع التي تختلف فيها أوضاع الأسلاك المعدنية باختلاف الاتجاهات والمحاور التي نود قياس الاستطالة بموجبها .

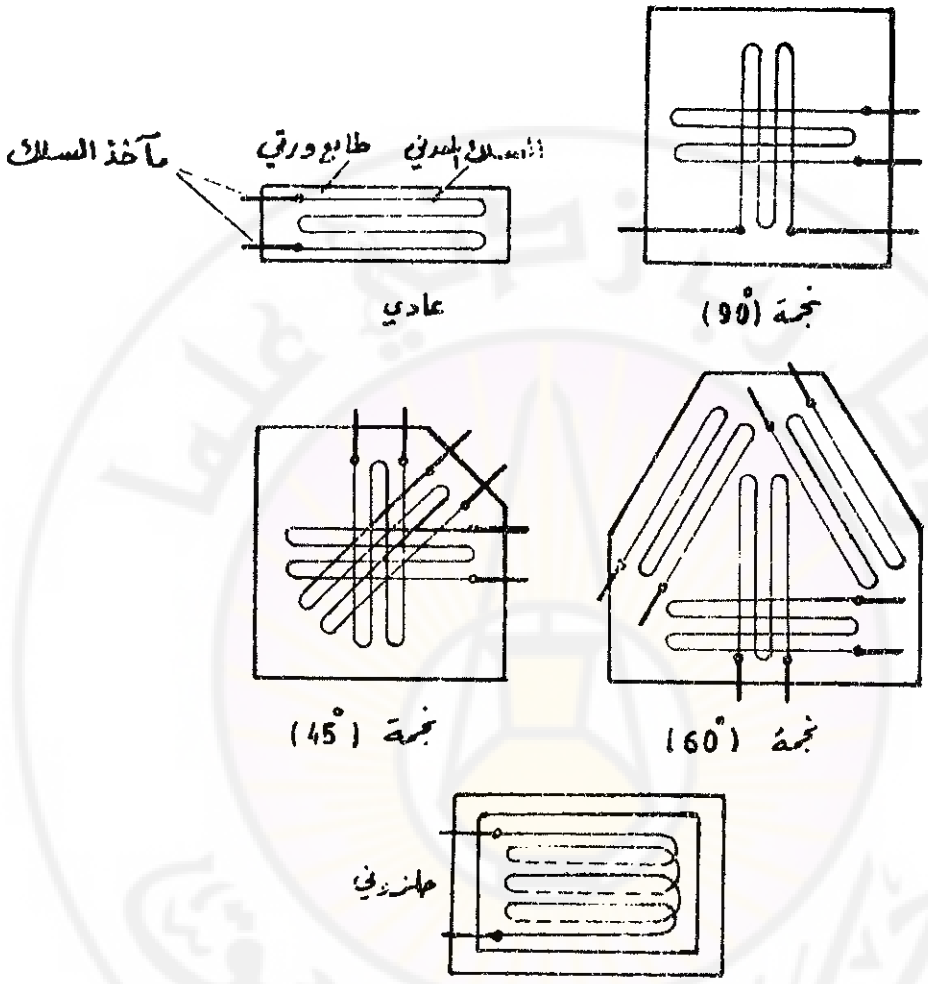
فعندما تبدأ العينة بالاستطالة يستطيل معها السلك المعدني ويتغير مقطعـه وتتغير بالتالي مقاومته . فاذا علمنا أن :

$$\frac{dR/R}{dL/L} = K \qquad (8.4)$$

حيث : R ــ مقاومة السلك المعدني .

L ــ طول السلك المعدني .

K ــ عامل المقياس للسلك (أو حساسية الانفعال).



الشكل (٨ ـ ٤) : اشكال مختلفة للطوابع اللاصقة المستعملة في قياس الانفعالات.

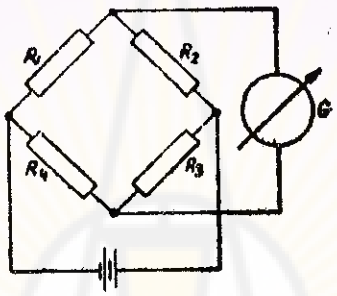
وهذا يعني أن التغير في المقاومة الكهربائية لسلك يتناسب خطيا مع مقدار انفعاله . فاذا عرفنا مقدار التغير في مقاومة السلك وعرفنا عامل المقيـاس (K) فاننا نستطيع حساب انفعال هذا السلك من العلاقة السابقة :

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{K \cdot R} = (R_1 - R)\,\frac{1}{K \cdot R} \qquad (8.5)$$

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 جسروتستون (السلك هو المقاومة R_1 في جسر وتستون المبين في الشكل ٨ ــ ٥) • فأثناء التحميل يمر في الغالفانومتر تيار كهربائي يتناسب مع تغير المقاومة وبالتالي مع استطالة العينة •

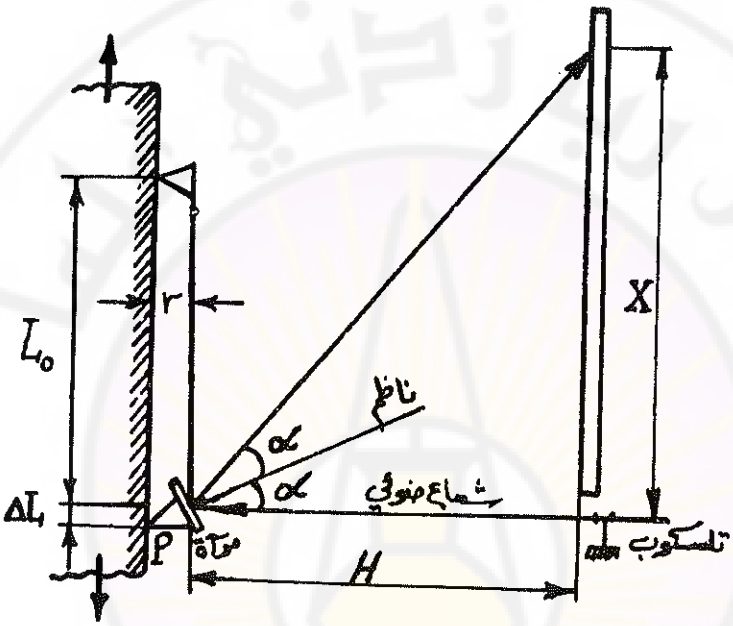


الشكل (٨ ــ ٥) : الطابع اللاصق عبارة عن احدى المقاومات في جسر وتستون .

عندما يُبدأ 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 ٨ــ٥) وعندئذ يصبح التيار المار في المقياس متناسبا فقط مع استطالة العينة •

٤ــ 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 ٠ ومنه يمكن أن نعد أن البعد X في الشكل (٨ ــ ٦) يتناسب مع استطالة العينة ٠



الشكل (٨ ــ ٦) : مبدأ الطريقة الضوئية في قياس استطالة العينة المختبرة على الشد.

فإذا استطالت العينة فان 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 ٠ وبالتالي يكون مقدار التكبير الحاصل في الاستطالة هو M ، حيث :

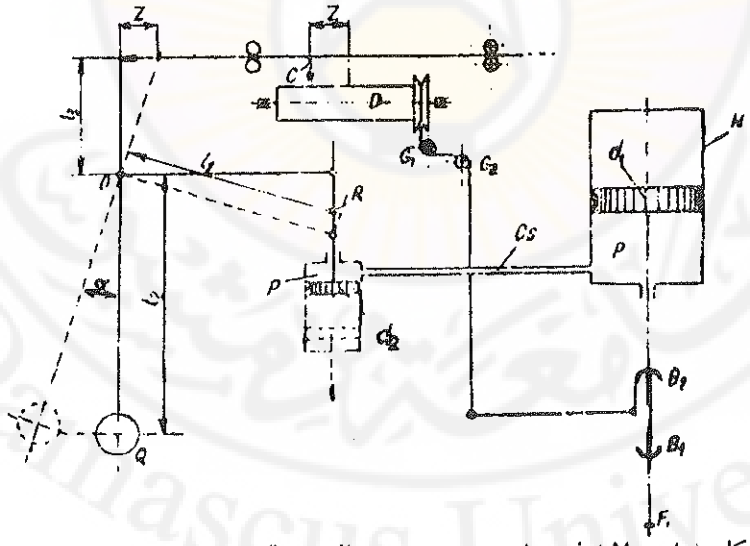
$$M = \frac{X}{\Delta L} = \frac{H \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{r \cdot \sin \alpha} \qquad (8.6)$$

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 قيمةقدرها (0,1 mm) على التدريج وهذا يقابل استطالة مقدارها (0,0002 mm) .

٨ ــ ١ ــ ٤ ــ كيفية الحصول على مخطط الاجهاد ــ الانفعال وخواص هذا المخطط :

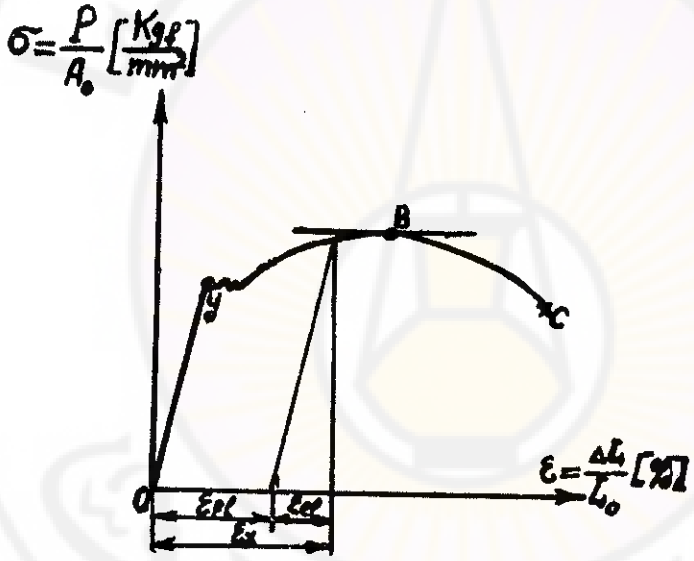
تقوم آلات الشد الحديثة برسم منحني الشد (أي مخطط الحمولة ــ الاستطالة) مباشرةً أثناء الاختبار . ففي الآلات الهيدروليكية مثلاً يتم رسم هذا المخطط بلف ورقة ميليمترية على اسطوانة يوجد على احدى نهايتيها بكرة يلف عليها خيط ويمرر على عدد من البكرات ثم يربط بالرأس المتحرك لآلة الشد (انظر الشكل (٨ ــ ٧) . ويرضع فوق الاسطوانة قلم مربوط بخيط وتربط احدى نهايتي هذا الخيط بنابض وتربط نهايته الاخرى بذيل نواس ثقلي يحرك عن وضع التوازن مكبس صغير يستمد ضغطه من ضغط مكبس آلة الشد نفسها ؛ وهكذا تكون حركة الاسطوانة الدورانية تحت القلم متناسبة مع استطالة العينة بينماتكون



الشكل (٨ ــ ٧) : جهاز رسم منحني الحمولة ــ الاستطالة في آلة اختبار الشد.

حركة القلم المحورية فوق الاسطوانة متناسبة مع القوة المطبقة على العينة •وبهذا الشكل نحصل على مخطط الحمولة ــ الاستطالة (P – △L) .

يُرسم مخطط الاجهاد ــ الانفعال من المخطط الأساسي (P–△L) وذلك بأخذ عـدد كافٍ من نقاط منحني المخطط (P – △L) . وبما أن لكل نقطـة الاحداثيات (P, △L) فنحن نقوم بتقسيم (P) على مساحة مقطع العينةالأولي قبل الاختبار (A_0) لنحصل على الاجهاد (σ) ، ونقسّم (△L) على طول العينة الأولي أيضاً (L_0) لنحصل على الانفعال (ε) ــ انظر الشكل (٨ــ٨)•



الشكل (٨ ــ ٨) : مخطط الاجهاد ــ الانفعال .

نلاحظ على منحني الاجهاد ــ الانفعال مرحلتين متميزتين عن بعضهما :

١ً ــ 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 ــ ٨) هذا المجال (تقريباً) • ويتعلق ميل هذا المستقيم بنوع المادة ويُسمى عامل المرونة أو عامل يونغ (Young) ويرمزله بالرمز (E) بحيث :

$$E = \operatorname{tg} \alpha \qquad (8.7)$$

فإذا علم ميل المستقيم فان معادلته تصبح :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad (8.8)$$

وهي المعادلة المعروفة بقانون هوك (Hocke) .

٢ً ــ مرحلة اللدونة : وهي المرحلة التي تلي مرحلة المرونة مباشرةوتشمل مجال الاجهاد من حــدود المرونة وحتى الانكسار ، وبازالة الاجهاد يزول جزء من الانفعال بشكلٍ يوازي مستقيم المرونة $\overline{oo}$ (وهو الجزء المرن من الانفعال)، أما الجزء الآخر من الانفعال فلا يزول وهو الجزء اللدن . لهذا تسمى هذهالمرحلة مرحلة اللدونة .

من الشكل (٨ ــ ٨) يمكن أن نكتب :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl.} \qquad (8.9)$$

ونستطيع أن نميز على منحني الاجهاد ــ الانفعال ثلاث نقاط هي :

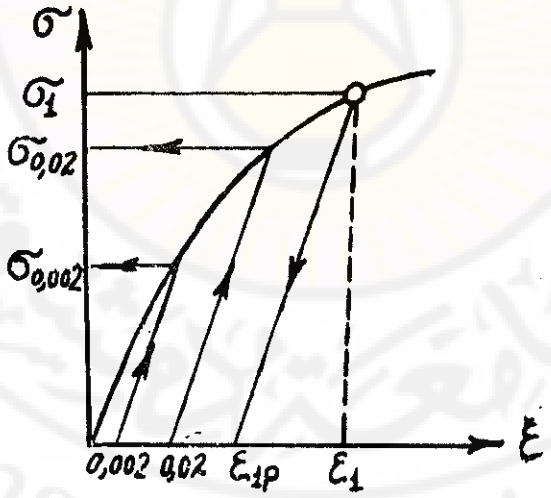
١ً ــ النقطة Y : وتبيّن حد الانسياب (أو حــد الخضــوع) للمادة المختبرة .

٢ً ــ النقطة B : وتبيّن حد الإجهاد الأعظمي الذي تتحمله المادة أثناء الشد .

٣ً ــ النقطة C : وتبيّن الجهــد المطبق على المادة في لحظة انكسارالعينة.

إن معرفة النقطة التي يبدأ عندها الانفعــال اللدن أمر" في غاية الأهمية لكون تلك النقطة هي حــد المرونة الفعلي للمادة . غير أن تحديد تلك النقطة بأجهــزة

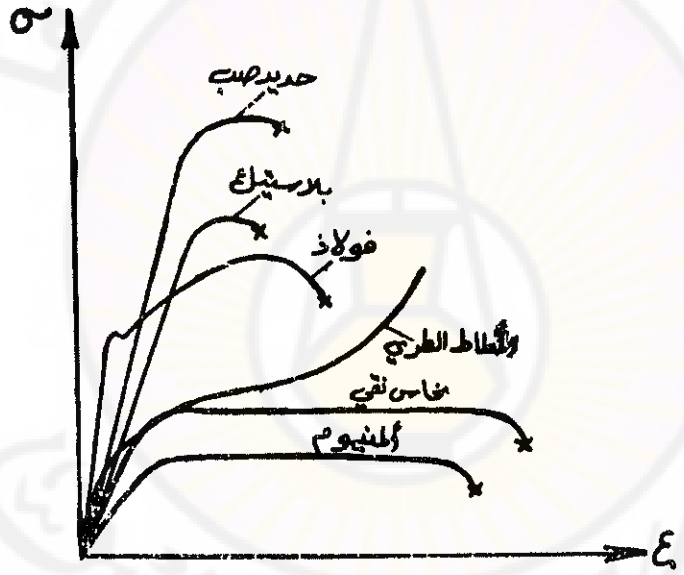
القياس المستعملة في الوقت الحاضر ليس بالأمر السهل وغالباً مايكون غير ممكن، لذلك فقد اصطلح على أن يُعد حد المرونة للمادة هو ذلك الاجهاد الذي يترك فيها بعد التحميل انفعالاً لدناً مقداره ٠٫٠٢ أو ٠٫٠٠٢ ، وتحديد هذا الاجهاد سهل إلى حدٍ ما حيث يمكن الحصول على قيمته هندسياً (انظر الشكل ٨ ــ ٩) وذلك بتحميل العينة 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_{1p} 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_{1p}) على الخط الأفقي ؛ فلو أخذنا الآن على الخط الأفقي نقطة تبعد عن المركز (O) بمقدار يتناسب مع 0,02 أو 0,002 وأخذنا منها موازياً للمستقيم السابق فان هذا الموازي سوف يقطع المنحني في نقطة مسقطها على المحور الشاقولي يعطينا قيمة الاجهاد المطلوب تحديده ٠ وتتبع طريقة مماثلة



الشكل (٨ ــ ٩) : مخطط الحصول على أعلى قيم لحد المرونة الذي يترك في العينة انفعالاً معينا .

لتحديد حد الانسياب عندما لايكون واضحاً في منحنيات الشد لبعض المـواد ، حيث اصطلح أيضاً أن يعد الإجهاد الذي يترك انفعالاً لدناً قدره ٢ر٠ هو حـد الانسياب لمثل هذه المواد ٠

يوجد بصفة عامة ثلاثة أشكال من منحنيات الاجهاد ــ الانفعال ٠ فأحد هذه المنحنيات يُبيِّن أن مرحلة اللدونة عند بعض المواد (مثل النحـاس والألمنيـوم والفولاذ) تكون واسعة ، وتسمى هذه المواد المواد المطيلية (انظر الشكل ٨ ــ ١٠) فيما يُبين المنحني الآخر أن مرحلة اللدونة صغيرة إذا ماقورنت بتلك في المواد المطيلية،



الشكل (٨ ــ ١٠) : منحنيات الاجهاد ــ الانفعال لمواد مختلفة

وهذا واضح من الشكل (٨ ــ ١٠) بالنسـبة لحديـد الصب والبلاستيك ، إذ تُسمى هذه المواد المواد الهشـة (القصيفة) ٠ ويختلف المنحني الثالث اختلافـاً كبيراً (من حيث نوعية العلاقـة بين الاجهاد والانفعال) عن المنحنيين السابقين (مثال على ذلك المطاط الطري ــ انظر الشكل ٨ ــ ١٠) ٠

٨ ـ ١ ـ ٥ ـ 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 المعروفةوهي أن حجم العينة يبقى ثابتاً أثناءالتحميل ($A_0 L_0 = A_i L_i$)

حيث : L_0 ، L_i – طول العينة الأصلي وبعد التحميل بالترتيب .

A_0 ، A_i – مساحة مقطع العينة قبل الانفعال وبعده .

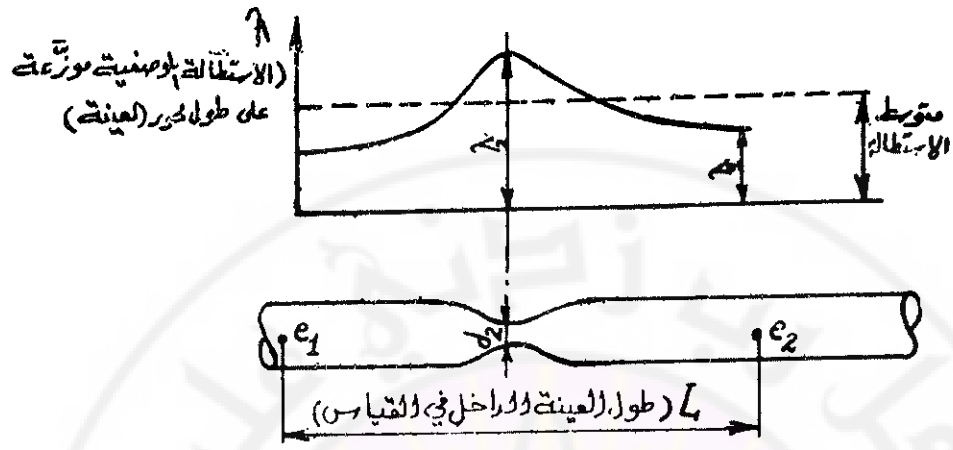
١ ـ **الانفعال العادي :** وهو نسبة الاستطالة إلى الطول الأصلي للعينة :

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L_0} \Longrightarrow \varepsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} = \frac{A_0}{A_i} - 1 \qquad (8.10)$$

٢ ـ **الانفعال الحقيقي :** وهو نسبة الاستطالة إلى الطول اللحظي (أو الآني) للعينة :

$$d\lambda = \frac{dL}{L_i} \Longrightarrow \lambda = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L_i} = ln \frac{L_i}{L_0} = ln \frac{A_0}{A_i} = 2\, ln \frac{d_0}{d_i} \qquad (8.11)$$

٣ ـ **الانفعال الموضعي :** إذا قسّم طول العينة إلى أجزاء صغيرة وقيس الانفعال في كلٍ من هذه الاجزاء على حدة سُمي عندئذ الانفعال الموضعي . والانفعال الموضعي هذا يكون واحداً على طول محور العينةإذا كان التغير فيهامتجانساً،أما في



الشكل (٨ ــ ١١) : توزع الانفعال على طول محور العينة أثناء اختبار الشد

حال عــدم التجانس فسوف يتغير الانفعال الموضعي من جزء إلى آخر على طول محور العينة (انظر الشكل ٨ ــ ١١) .

٤ــ التقلص العادي : يمكن أن يعبر عن انفعال العينة بالتقلص النوعي للمقطع بدلاً من الاستطالة النوعية . والتقلص العادي هــو نسبة تغير مساحة مقطع العينة الى مساحــة المقطع الأصلية :

$$\Psi = \int_0^{\Psi} d\Psi = -\int_{A_0}^{A_i} \frac{dA}{A_0} = \frac{A_0 - A_i}{A_0} \qquad (2/8.11)$$

٥ــ التقلص الحقيقي : وهو نسبة تغير مساحة مقطع العينة الى مساحــة المقطع اللحظية :

$$\Psi' = \int_0^{\Psi} d\Psi' = -\int_{A_0}^{A_i} \frac{dA}{A} = \ln \frac{A_0}{A_i} \qquad (8.12)$$

ويمكننا من العلاقات آنفة الذكر أن نستنتج العلاقة بين هذه القيم. فالانفعال الحقيقي مثلاً يمكن أن يكتب بأحد الاشكال الثلاثة التالية :

$$\lambda = \Psi' \quad ; \quad \lambda = \ln (1 + \varepsilon) \quad ; \quad \lambda = ln \frac{1}{1 - \Psi} \qquad (8 \cdot 13)$$

بينما توجد العلاقة التالية بين الانفعال والتقلص العاديين :

$$\varepsilon = \frac{\Psi}{1 - \Psi} \qquad (8 \cdot 14)$$

٦ ـ معامل بواسون (Poisson) : وهو النسبة بين **الانفعال العرضي** و**الانفعال الطولي** (أي النسبة بين التقلص العادي والانفعال العادي) وضمن مجال **الانفعال** الذي يتم فيه استخدام قانون هوك :

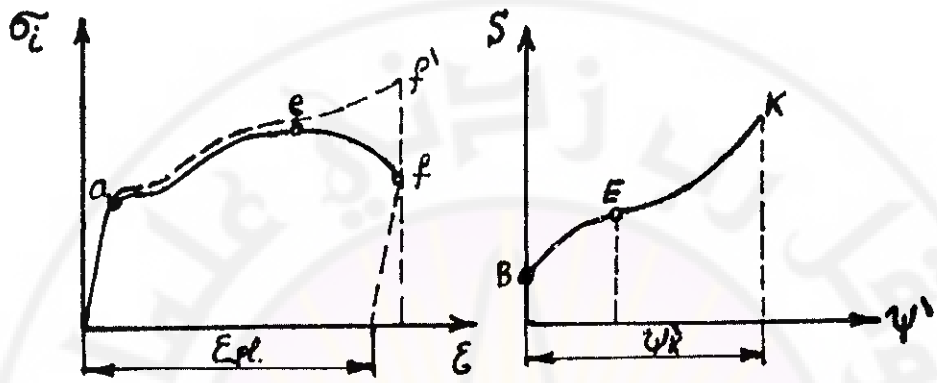
$$\mu = - \frac{\Psi}{\varepsilon} \qquad (8 \cdot 15)$$

وتختلف قيم معامل بواسون من مادة إلى أخرى ، فمثلاً للفولاذ ($\mu \approx 0,3$) وللنحاس والألمنيوم ($\mu = 0,32 \div 0,36$) وللمطاط ($\mu \approx 0,5$) وللبيتون ($\mu = 0,16 \div 0,18$) .

٧ ـ الاجهاد الحقيقي : يمكننا أن نحصل على مخطط أكثر دقة ووضوحاً من المخطط المرسوم في الشكل (٨ ـ ١٢) ، حيث يُبيِّن 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 :

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_i} = \frac{P_i / A_0}{A_i / A_0} = \frac{\sigma}{A_i / A_0} = \sigma \left(\frac{A_0}{A_i} \right) = \sigma (1 + \varepsilon) \qquad (8.16)$$



الشكل (٨ ــ ١٢) :

a) علاقة الاجهـاد العادي والاجهاد الحقيقي بالانفعال .

b) علاقة الاجهاد الحقيقي بالتقلص الحقيقي .

ويُبيِّن الشكل (٨ ــ ١٢ a) مخطط الاجهاد العادي والحقيقي للفولاذ (الاجهاد الحقيقي هو الخط المتقطع على الشكل) وعلاقتهما بالانفعـال. بينما يُبين الشكل (٨ ــ ١٢ b) مخطط الاجهاد الحقيقي للفولاذ وعلاقته بالتقلص الحقيقي حيث ($S = \frac{P_i}{F_i}$) ، وتُبيِّن النقطة B في هذا الشكل بداية تشكل الانفعالات اللدنة المتبقية (أي حد الانسياب) ، بينما تُبين النقطة E حـد الاجهاد الأعظمي الحقيقي والنقطة K حد الانكسار .

٨ً ــ العمل الناتج عن انفعال العينة أثناء الاختبار : إن العمل الكلي اللازم لكسر العينة يتحدد بالعلاقة التالية :

$$W_{all} = \int_{L_0}^{L_c} F\,dL \qquad (8.17)$$

وأما العمل النوعي فهو نصيب وحدة الحجم من العينة من العمل الكلي :

$$W = \int_{L_0}^{L_c} \frac{F\,dL}{V_0} \qquad (8.18)$$

وبما أن ($V_0 = A_0 L_0 = A_i L_i$) فان معادلة العمل النوعي يمكن أن تكتب بأحد الشكلين التاليين :

$$W = \int_{L_0}^{L_c} \frac{F\,dL}{A_0 L_0} = \int_0^{e_c} \sigma\,d\varepsilon \qquad (8.19)$$

أو :

$$W = \int_{L_0}^{L_c} \frac{F\,dL}{A_i L_i} - \int_0^{\lambda_c} \sigma'\,d\lambda \qquad (8.20)$$

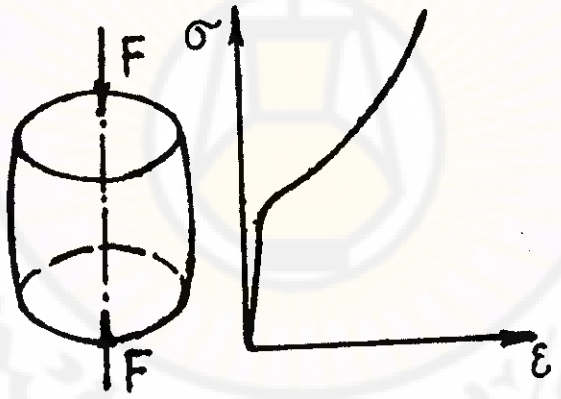
٨ ـ ٢ ـ اختبار الضغط :

على الرغم من بساطة اجراء اختبار الضغط إلا أنه نادراً مايستخدم 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

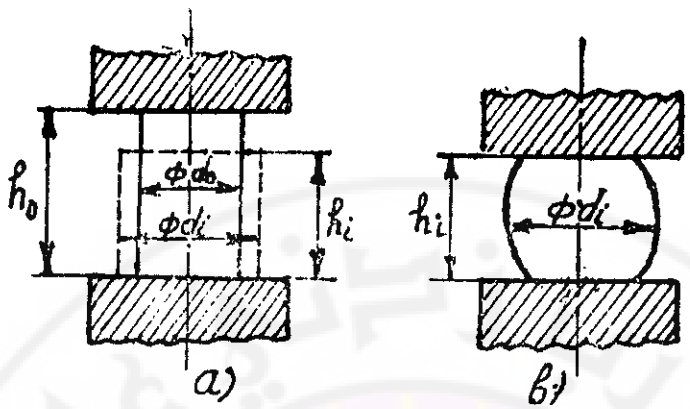
ضغط المعادن اللدنة فانه لايمكن الحصول عليه ذلك لأن عينة الاختبار لاتنكسر وانما تتحـول العينة الاسطوانية الشكل مثلاً إلى قرص وتبقى قوة الضغط بازدياد مستمر (انظر الشكل ٨ ــ ١٣) ، ولهذا فان بعض الوحدات المماثلـة للانفعال النسبي والتقلص النسبي عند انكسار العينة على الشد لايمكن الحصول عليها في حالة الاختبار على الضغط .

إن المواد التي تُختبر على الضغط هي بصفة عامة مواد هشة وهي عـادةً تقاوم الضغط أكثر من الشد ، وتستخدم هذه المواد في إعـداد العناصر الإنشائية التي تعمل على الضغط ، فعند تصميم هذه العناصر لابد من معرفة بعض الوحدات المستنتجـة من اختبارات الضغط لعينات اختبار مصنوعة من مواد هذه العناصر نفسـها .



الشكل (٨ ــ ١٣) : منحني الاجهاد ــ الانفعال في اختبار الضغط .

يُجرى اختبار الضغط على آلات اختبار خاصة أو على الآلات الهيدروليكية المستخدمة في اختبارات الشد كالمبينة في الشكل (٨ ــ ٢) حيث توضع عينـة الاختبار على الوجـه العلوي A_2 للرأس المتحرك T_1 ، وعند التحميل تنضغط



الشكل (٨ ــ ١٤) : تغير ابعاد العينة في اختبار الضغط

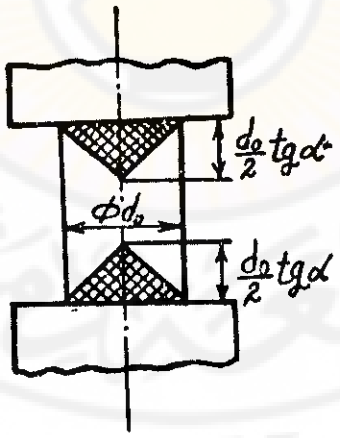
العينة بين الرأس T_1 ورأس الضغط الثابت في جسم الآلة A_1 . فاذاضغطت عينة مصنوعة من الفولاذ الكربوني منخفض نسبة الكربون فانه نظرياً سوف ينقص ارتفاع العينة من h_0 إلى h_i ويزداد قطرها من d_0 إلى d_i (انظر الشكل ٨ ــ ١٤) ولكن عملياً فان العينة لاتستطيع أن تغير شكلها بشكل حر لأن تلامس سطحها العلوي والسفلي 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 بخاصة في العينات الندية في حين أن الانفعال كان تقريباً متجانساً في تجربة الشد حتى بداية ظهور الاختناق في مقطع العينة .

٨ ــ ٢ ــ ١ ــ اختيار العينات في اختبار الضغط :

يتحدد شكل عينة الضغط وأبعادها تبعاً لنوع المادة المراد اختبارهاواستطاعة الآلية بالاضافة إلى الهدف من اجراء الاختبار . ويفضل أن تكون العينة ذات شكل اسطواني وذلك لتأمين انطباق محورها على محور التحميل ولتنظيم توزع

الاجهادات في مقاطع العينة قـدر الامكان أثناء التحميل ، أما ارتفاع العينة فيجب أن تقع قيمه ضمن مجالٍ معين ومحدود وذلك للسبب التالي :

إن تغير الشكل الناتج في حال الشد أ والضغط وسواءً أكان استطالـة أم تقلصـا ماهو إلا نتيجه لانزلاق المستويات البلورية بعضها على بعض ، والانزلاق يتم عادةً في المستويات التي تكون فيها اجهادات الانزلاق (القص) أعظمية – أي المستويات التي تميل على اتجاه القوة المؤثرة بزاوية قدرها ٤٥° . لهـذا ونتيجة للاحتكاك بين سطحي العينة ورؤوس التحميل فسوف يتشكل في العينـة عند كلٍ من السطحين العلوي والسفلي مخروط خامل لايظهر فيه أي انفعـال، قاعـدته هي سطح العينة ورأسه واقـع على محور العينة ، زاويته الرأسية ٩٠° أي أن ارتفاعه يساوي $d_0/2$ (انظر الشكل ٨ – ١٥) . لهذا يجب أن لايقل طول العينة عن d_0 كيلا يتلامس المخروطان الخاملان كما أنه يجب الايكـون هذا الطول كبيراً جداً كيلا تظهر في العينة اجهادات جانبية تؤثر في نتائج التجربة، وغالباً مايختار طول العينة بحيث يكون ($d_0 < h_0 < 3\,d_0$) .



الشكل (٨ – ١٥) : المخروط الخامل في العينة أثناء اختبارها على الضغط .

٨ ـ ٢ ـ ٢ ـ منحني الاجهاد ـ الانفعال في اختبار الضغط :

يمكن أن يتم رسم منحني القوة ـ الاستطالة في اختبار الضغط (كما في اختبار الشد) أثناء إجراء الاختبار على ورقة ميليمترية ملفوفة على اسطوانة. يؤخذ أكبر عدد ممكن من النقاط على المنحني الناتج بحيث نوجد لكل نقطة الإجهاد العادي (الهندسي) σ والانفعال المقابل لهذا الاجهاد • وبهذا الشكل نحصل على منحني الإجهاد ـ 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 :

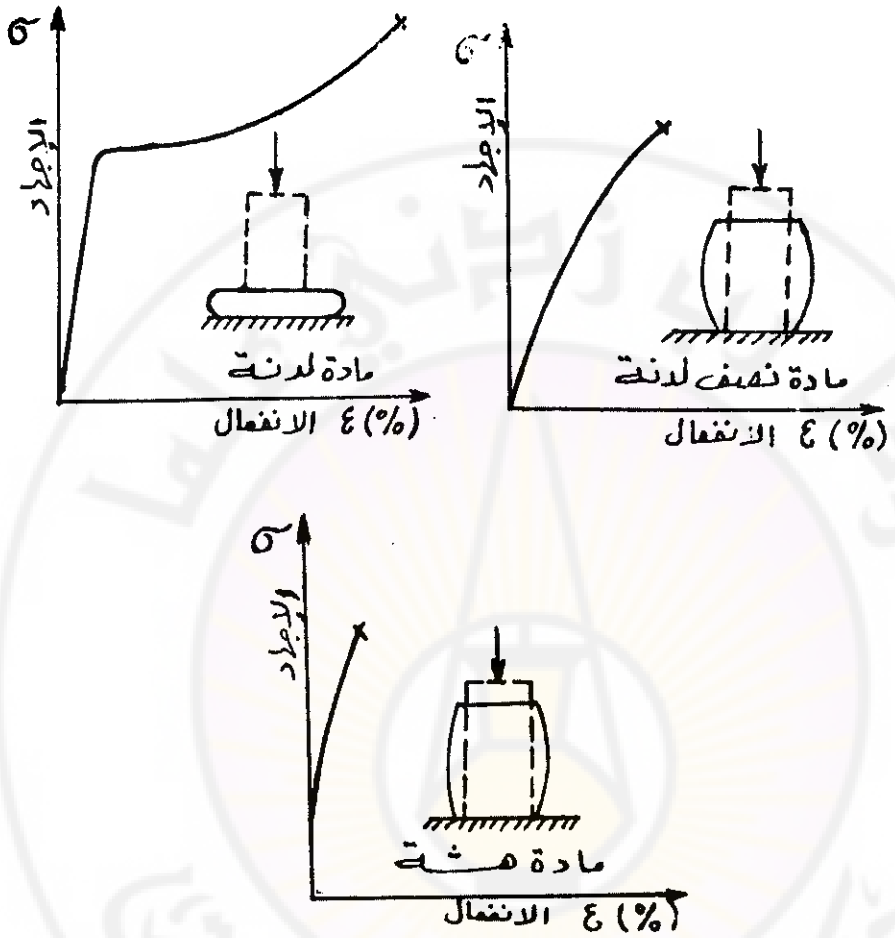
$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \qquad (8.21)$$

وحسب فرضية ثبات الحجم يصبح الانفعال العادي :

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_1}{h_0} = 1 - \frac{A_0}{A_1} \qquad (8.22)$$

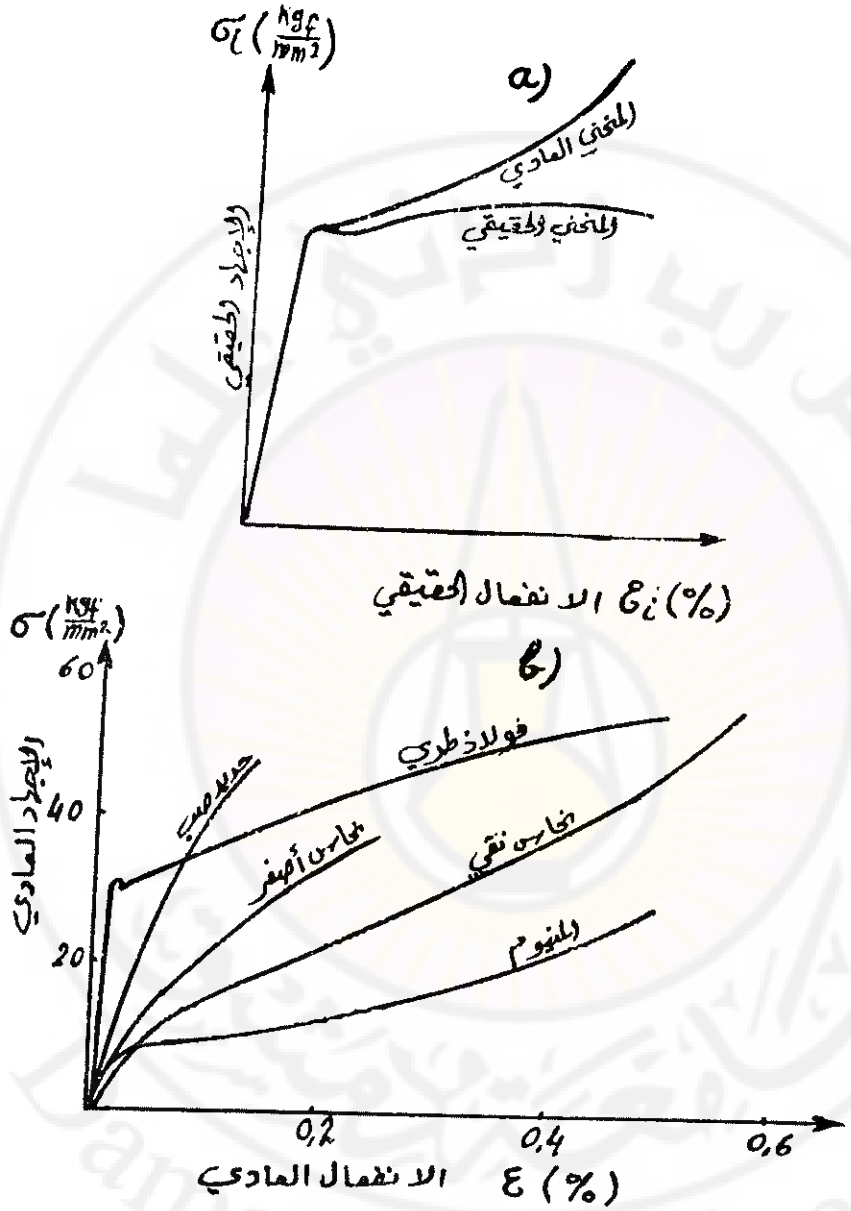
يتعلق شكل منحني الضغط الناتج بنوعية المادة المختبرة (هشة أو نصف لدنة أو لدنة)، ويبيّن الشكل (٨ ـ ١٦) اختلاف شكل منحني الضغط باختلاف نوع المادة المختبرة •

ويجب أن ننوه هنا إلى أنه إذا كانت المادة المختبرة على الضغط هشة أو نصف لدنة فان منحني الاجهاد العادي ـ الانفعال العادي يمكن أن يعطي المعلومات التقريبية عن حالة هذه المادة أثناء اختبار الضغط ، أما إذا كانت المادة لدنة فانهذا



الشكل (٨ ــ ١٦) : تغير شكل منحني الاجهاد ــ الانفعال بتغير نوع المادة المختبرة على الضغط .

المنحني لن يعد مقبولاً ويجب استبدال منحني الاجهاد الحقيقي ــ الانفعال الحقيقي به (انظر الشكل ٨ ــ ١٧ (a)) ذلك لأن تغير مقطع العينة لن يكون واحداً في أجزائها كافة وبالتالي فان قيمة سوف تختلف من نقطة إلىأخرى على طول محورها . لذلك يتم حساب كلٍ من قيم الاجهاد والانفعال اللحظيين وفق المعادلتين التاليتين :



الشكل (٨ ــ ١٧) :

a) منحني الاجهاد الحقيقي ــ الانفعال الحقيقي .

b) منحني الإجهاد العادي ــ الانفعال العادي لبعض المعادن والخلائط المعدنية .

$$\varepsilon_i = ln \frac{A}{A_0} = ln (1 - \epsilon) \qquad (8.23)$$

$$\sigma_i = \frac{P}{A} = \sigma (1 - \varepsilon) \qquad (8.24)$$

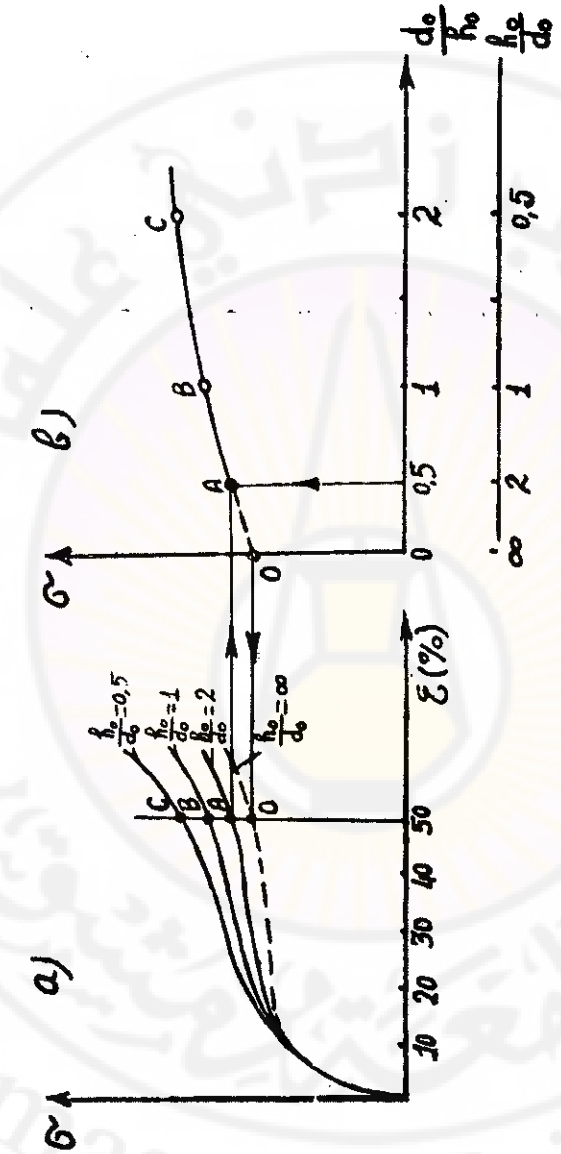
ومع كل هذا فان منحنيات الضغط المتوافرة في المراجع للسعادن والخلائط المعدنية هي منحنيات من النـوع اجهاد عادي ـ انفعـال عادي (انظر الشكل ٨ ـ ١٧ b) .

٨ ـ ٢ ـ ٢ ـ منحني الضغط للعينة اللانهائية الطول :

نظراً لعدم تجانس الانفعال فان قيمة الاجهاد (سواء العـادي أو الحقيقي) المحسوب من العلاقات الواردة في البند السابق سوف تتغير بتغيير مقاييس العينة وبالضبط بتغير نسبة طـول العينة إلى قطرها ($\frac{h_0}{d_0}$) . ولقد بيّنا آنفاً أنه يجب أن لاتكون النسبة ($\frac{h_0}{d_0} \leqslant 1$) حتى لايتلامس المخروطان الخاملان (انظر الشكل ٨ ـ ١٥) ، كما أنه يجب ألا تزيـد هذه النسبة عن الرقم 3 بكثير حتى لاتظهر في العينة إجهادات جانبية تؤثر في نتائج التجربة (أي حتى لايحصل انبعـاج في العينة نتيجة لوجود عزم انحناء بجانب حمل الضغط) .

إن السبب في تصور العينة الطويلة جـداً (أي اللانهائية في الطـول) والبحث عن منحني الضغط لهذه العينة هو محاولة التخلص من تأثير الاحتكـاك الحاصل بين نهايتي العينة والرؤوس الضاغطة في نتائج القياس .

يحتوي المخطط المبين على الشكل (٨ ـ ١٨ a) على عددٍ من منحنيات الضغط لعينات مختلفة المقاييس ولكنها معدة من معدن واحد ؛ فبالاستعانة بهذه المنحنيات يمكن أن نرسم بشكل تقريبي منحني الضغط النظري للعينة اللانهائيـة



الشكل (٨ ــ ١٨) : استنتاج منحني الضغط للعينة اللانهائية الطول .

(أي التي تحقق مقاييسها النسبة : $\frac{h_0}{d_0} = \infty$) ، 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 المبيَّن على الشكل (٨ ــ ١٨ b) ، وبتمديد هذا المنحني حتى يقطع المحور الشاقولي نحصل على قيمة الاجهاد الذي يسبب الانفعال نفسه في العينة اللانهائية في الطول ، وبالتالي يمكننا أن نقوم برسم منحني ضغط هذه العينة بشكل تقريبي (انظر المنحني المتقطع على الشكل ٨ ــ ١٨ b) .

٨ ــ ٣ ــ اختبار الانحناء :

لايعني 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" ــ إن الانفعال الذي يحدثه الانحناء في عينة الاختبار يكون كبيرا 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 ، ولايلزم في هذه الحالة تطبيق قوى كبيرة للحصول على انفعالات كبيرة، إذ أن سهم الانحناء يكون كبيرا عندما تكون القوى المطبقة صغيرة وعينات الاختبار طويلة ، ولهذا يعد هذا الاختبار من الاختبارات الأساسية للسوادالهشة

مثل حديد الصب حيث يسهل بهذا الاختبار تعيين بعض الخواص الميكانيكية لهذه المواد والتي من الصعب تعيينها باختبار الشد .

٢ً ــ يمكن تدوين العلاقة بين الحمل المطبق وسهم الانحناء بهدف دراسة خواص المرونة واللدونة للمادة المختبرة في منحن مشابه لمنحني الاجهاد ــ الانفعال في اختبارات الشد والضغط .

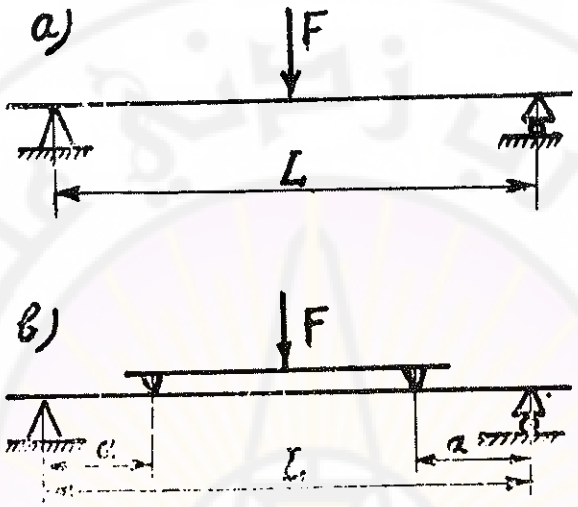
٣ً ــ إن أغلب العناصر لا تتعرض إلى اجهادات شد أو ضغط أو قص بمفردها . وانما يمكن أن تتعرض الى مجموعة مركبة من هذه الاجهادات . وبما أنه يمكننا باجراء اختبار الانحناء المناسب أن نعرض عينة الاختبار الى مجموعة الاجهادات آنفة الذكر في آن واحد فاننا نكون بهذا قد اقتربنا من ظروف التحميل الحقيقية التي يتعرض لها عنصر الإنشاء .

٤ً ــ 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 الاخرى ، كما أن إجراء الاختبار على الانحناء لايلزمه تصميم آلات اختبار خاصة واعدادها وإنما يمكن أن يتم على آلة الشد العامة نفسها (انظر الشكل ٨ ــ ٢) وذلك بعد تجهيز وجهي الضغط بالرؤوس المناسبة ، بحيث يجهز الوجه السفلي المتحرك بالرأس الحامل لنقطتي الاستناد والوجه العلوي بالرأس الحامل لنقاط تأثير القوة .

٨ ــ ٣ ــ ١ ــ 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 الاعلى عبر رأس اسطواني الشكل أيضاً وذلك كي نضمن تركيز الإجهادات في نقاط التماس بين رأس التحميل وسطح العينة . ويمكن

أن يكون تأثير قوة التحميل في نقطة واحدة عند منتصف البعد بين نقتطي الاستناد (انظر الشكل ٨ ــ ١٩ a) وفي نقطتين متساويتي البعد عن النقطتين المذكورتين (انظر الشكل ٨ ــ ١٩ b) .

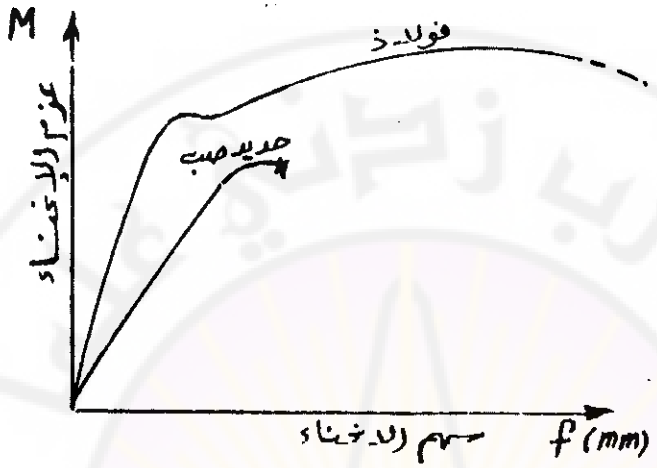


الشكل (٨ ــ ١٩) : رسم تخطيطي يبين كيفية تحميل العينة عند إجراء اختبار الانحناء الستاتيكي .

إن الوحدات التي تقاس أثناء اختبار الانحناء الستاتيكي هي القوة F (أو عزم الانحناء M) ومقدار الانحناء الاعظمي عند منتصف طول العينة وترسم في مخطط بياني مماثل لمخطط الشد فنحصل على المخطط المبيّن على الشكل (٨ ــ ٢٠) والذي يُسمى منحني الانحناء . فاذا كانت العينة لدنة فاننا نلاحظ من الشكل أن الانفعال اللدن يستمر لفترة طويلة ، والسبب في ذلك هو عدم تشكل أي اختناق أثناء الانحناء ، ولاتبدأ 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 والانفعال (أو سهم الانحناء) ضمن هذا المجال هي علاقة خطيةحسب نظرية هوك .

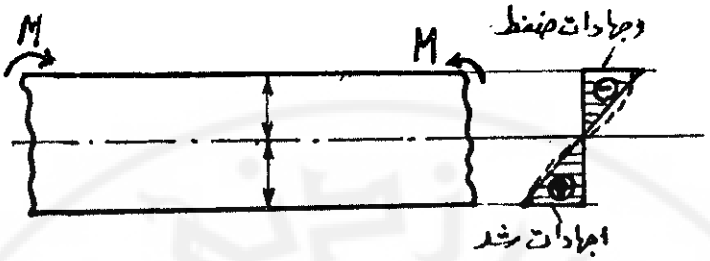


الشكل (٨ ــ ٢٠) : منحنيات الانحناء الستاتيكي لكل من الفولاذ وحديد الصب .

يكون عزم الانحناء أعظمياً عند نقطة تأثير القوة ، أي أن :

$$M_{max} = \frac{F \cdot L}{4} \qquad (8.25)$$

أما الاجهادات فهي إجهادات ضغط في النصف العلوي من مقطع العينة وإجهادات شد في النصف السفلي ، أما الخط الفاصل بين مجالي الضغط والشد فيُسمى الخط المحايد (انظر الشكل ٨ ــ ٢١) . ويجب أن ننوه إلى أنه إذا كان اختبار الانحناء يجري ضمن مجال مرونة العينة فان الخط المحايد ينطبق على محور العينة ، ويكون الاجهاد بصفة عامة معدوماً عند هذا الخط ويزداد باتجاه السطحين حيث يصبح أعظمياً عند كل منهما . ويمكن ايجاد قيمة الاجهاد الاعظمي (سواءً إجهاد الشد أو الضغط) عند أيٍ من السطحين بالعلاقة التالية :



الشكل (٨ ـ ٢١) : توزع إجهادات الشد والضغط (التقريبية والحقيقية) على كامل مقطع عينة الاختبار .

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} \qquad (8.26)$$

حيث : W ـ عزم المقاومة المحوري للمقطع ، ويساوي في حال المقطع الدائري $\frac{\pi d^3}{32}$ (حيث : d ـ قطر المقطع) وفي حال المقطع المستطيل $\frac{b a^2}{6}$ (حيث : b ـ طول المستطيل و a ـ عرضه) .

فاذا افترضنا أن مقطع العينة المختبرة في حالتنا هذه دائري وأخذنا بعين الاعتبار قيمة العزم الأعظمي من العلاقة (8.26) فان الاجهاد الأعظمي يصبح مساوياً :

$$\sigma_{max} = \frac{F \cdot L/4}{\pi d^3/32} = \frac{8FL}{\pi d^3} \qquad (8.27)$$

أما سهم الانحناء الأعظمي عند نقطة تأثير القوة (أي في منتصف العينة) فتحدده العلاقة التالية :

$$f_{max} = \frac{1}{48} \cdot \frac{FL^3}{E \cdot I} \qquad (8.28)$$

حيث : I ـ 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 :

$$f_{max} = \frac{1}{12} \cdot \frac{FL/4}{W} \cdot \frac{L^2}{E \cdot \frac{d}{2}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sigma_{max} \cdot L^2}{E\,d} \qquad (8.29)$$

٨ ـ ٣ ـ ٢ ـ المقارنة بين الوحدات المستنتجة في كل من اختباري الشد والانحناء :

يتمتع الاجهاد الناتج في مقطع العينة (سواءً 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 ايجاد اجهاد المرونة في حالة الشد يتم باستخدام قانون هوك :

$$\sigma_{max} = E\,\varepsilon = E\,\frac{\Delta L}{L} \qquad (8.30)$$

ولهذا فان الاستطالة في حالة الشد تساوي :

$$\Delta L = \frac{\sigma_{max} \cdot L}{E} \qquad (8.31)$$

فاذا قارنا الاستطالة الناتجة لدينا من هذه العلاقة مع سهم الانحناء الذي يمكن أن ينتج عن تحميل العينة نفسها وبالقوة نفسها فاننا نحصل على النسبةالتالية:

$$\frac{f_{max}}{\Delta L} = \frac{L}{6\,d} \qquad (8.32)$$

وبما أن عينة اختبار الانحناء غالباً ما يكون طولها الفعال ٦٠٠ مم وقطرهـا ٣٠ مم فان :

$$\frac{f_{max}}{\triangle L} = \frac{600}{6 \times 30} = 3{,}33 \qquad (8.33)$$

أي الانتقال في حالة الانحناء يكون أكبر من الانتقال في حالة الشد للعينـة نفسها وفي الشروط نفسها بمقدار ٣٫٣٣ ضعفا • وإذا أخذنا بعين الاعتبـار أن عينة الشد غالباً ما يكون طولها ١٠٠ مم أو أقل فان المقدار السابق يصبح ٢٠ ضعفا أو أكثر ، وهكذا فان قياس سهم الانحناء أسهل وأكثر دقة من قياس الانفعـال 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 :

$$E = \frac{\sigma L^2}{6 f_{max} \cdot d} \qquad (8.34)$$

وفي كثير من الاحيان يتم إيجاد قابلية العينة للانحناء Φ وذلك من خـلال النسبة بين سهم الانحناء الاعظمي الناتج عند كسر العينة الى طولها الفعال :

$$\Phi = \frac{f_{max}}{L} \times 100 \qquad (8.35)$$

كما يمكن ايجاد معامل الانحناء الستاتيكي من خلال النسبة بين إجهاد الكسر في اختبار الانحناء الى إجهاد الكسر في اختبار الشد :

$$C_d = \frac{\sigma_d}{\sigma_t} \qquad (8.36)$$

ويجب أن ننوه هنا الى أن اختبار الانحناء يقتصر عادة على الاختبار أو التحميل حتى حد الانسياب للمادة المختبرة وذلك لأن توزع الإجهاد على المقطع بعد هذا الحد لا يبقى خطياً منتظماً (انظر الشكل ٨ ــ ٢١)، كما أن الخط المحايد ينزاح عن محور العينة .

٨ ــ ٤ ــ 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 فان المقاطع العرضية عند الفتل تدور بالنسبة لبعضها بعضا حول محور العينة ، لهذا فان طول العينة المختبرة يبقى ثابتا .

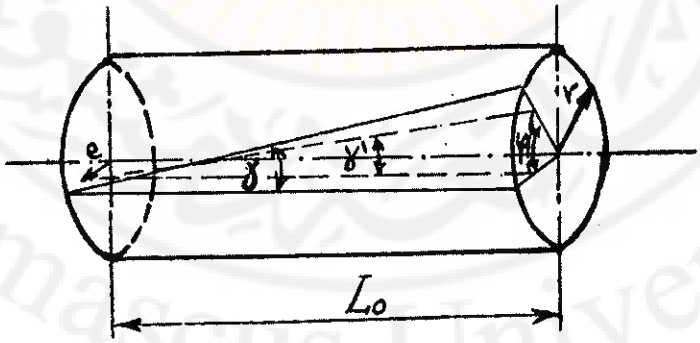
٨ ــ ٤ ــ ١ ــ اختيار العينات وإجراء الاختبار :

لا تخضع عينات اختبار الفتل الستاتيكي لمواصفات محددة وإنما يتم اختيار العينة طبقا للهدف المطلوب من إجراء هذا الاختبار . فاذا كان الهدف هو الحصول على قيم لبعض الخواص الميكانيكية والتي يستفاد منها في الحسابات التصميمية فان عينة الاختبار تكون اسطوانة مصمتة لها سطح خارجي ناعم ونهايتان يكون مقطعهما العرضي أكبر من المقطع العرضي للطول الفعلي للعينة وذلك بغية حصر

الكسر الناتج عن الفتل في المقطع الفعلي وليس عند نهاية العينة • أما اذا كان الهدف هو التعرف على مدى مقاومة عنصر ما من آلة (سواء أكان مقطعه دائرياً أم غير دائري وسواء أكان هذا العنصر منتظما على كامل طوله أم لم يكن كأن يحتوي على ثقب أو مسلك لخابور ••• الخ) فان الاختبار يُجرى على هذا العنصر بشكله وأبعاده الطبيعيين وليس على عينات مصنوعة من هذا العنصر •

ولإجراء الاختبار تُثبت العينة بين فكي آلة الاختبار بحيث تثبت احدى نهايتي العينة في جسم الآلة بينما تُحمل النهاية الاخرى بعزم فتل ، وبنتيجة التحميل فان كل مولد من مولدات سطح العينة والذي هو بالأساس مستقيم سوف ينفتل حول محور الاسطوانة ليشكل خطا لولبيا (انظر الشكل ٨ــ٢٢) ، ويصبح هذا الخط مائلاً على وضعه الاصلي بزاوية مقدارها γ ، وإذا أخذنا مقطعين للعينة (انظر الشكل ٨ــ٢٢) وكان البعد بينهما L_0 فان أحدهما سوف يدوز بالنسبة للآخر بزاوية φ (تسمى زاوية الفتل)، حيث تكبر هذه الزاوية عند زيادة عزم الفتل أو عند زيادة طول العينة أو عند زيادة كليهما معاً • ويساوي انفعال القص ظل الزاوية γ ، حيث :

$$\gamma = \varphi \cdot \frac{r}{L_0} \qquad (8.37)$$



الشكل (٨ ــ ٢٢) دوران مولدين من مولدات اسطوانة أثناء اختبارها على الفتل.

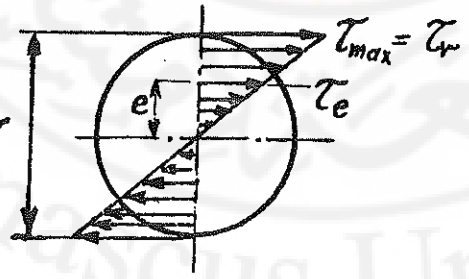
وإن مقدار الإجهاد في أي نقطة من جسم العينة تميزه زاوية ميل المولد المار بهذه النقطة على وضعه الاصلي قبل الفتل ، وهذه الزاوية تتناسب طرداً مع بعد هذا المولد عن محور العينة كما يتضح ذلك من الشكل (٨ ــ ٢٢) ، أي أن:

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{\varphi \cdot \frac{e}{L_0}}{\varphi \cdot \frac{r}{L_0}} = \frac{e}{r} \qquad (8.38)$$

٨ ــ ٤ ــ ٢ ــ الوحدات المقيسة والمستنتجة من اختبار الفتل :

إن الوحدات التي تقاس خلال تجربة الفتل هي عزم الفتل M وزاوية الفتل φ . ويتم قياس العزم بجهاز خاص يثبت على الآلة عند النهاية الثابتة للعينة ، أما الزاوية φ فتقاس بوساطة دائرة مدرجة من الصفر الى ٣٦٠° 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 وبتدوير النهاية المتحركة للعينة يدور معها المؤشر ويشير مباشرة على الدائرة المذكورة الى زاوية الدوران φ .

وبما أن الوحدات المقيسة خلال الاختبار هي عزم الفتل M وزاوية الفتل φ ، فان انفعال الفتل γ يتم حسابه وفق العلاقة (8.37). أما حساب



الشكل (٨ ــ ٢٣) : توزع إجهاد الفتل على قطر مقطع العينة

الاجهاد في مقطع عينة الاختبار فانه يتعلق بالاعتبارات التالية :

١ً ــ عند محور العينة (أي عندما تكون $r = 0$) فان الإجهاد يكــون معدوماً ، بينما يكون هذا الإجهاد أعظمياً عند سطح العينة (انظر الشكل ٨ــ٢٣)٠

٢ً ــ إن تزايد الإجهاد في المقطع بين المحور والسطح هو تزايد خطي ضــمن مجال مرونة العينة ، ولهذا فان قيمة الاجهاد على مسافة e من محور العينة يمكن كتابته بالشكل :

$$\frac{e}{\tau_{max}} = \frac{e}{r} \Longrightarrow \tau_e = \tau_{max} \cdot \frac{e}{r} \qquad (8.39)$$

٣ً ــ إن قيمة الاجهاد ضمن مجال المرونة تحسب عادةً بالعلاقة التالية :

$$\tau = \gamma \cdot G \qquad (8.40)$$

حيث : G ــ عامل مرونة الفتل ، وقيمة هذا العامل في المعادن هي :

$$G = 0{,}38\,E \cdot$$

ويمكن حساب قيمة الاجهاد من خلال عزم الفتل وبعد النقطة المراد حســاب الإجهاد فيها عن محور العينة • فمثلاً في النقاط التي تبعد بمقدار e عن محور العينة يكون الاجهاد مساوياً :

$$\tau_e = \frac{M}{I_p} \cdot e = \frac{M}{W_p \cdot \frac{d}{2}} \cdot e \qquad (8.41)$$

حيث : $d = 2r$

أما الإجهاد الأعظمي على السطح فتساوي قيمته :

$$\tau_{max} = \frac{M}{I_p} \cdot \frac{d}{2} = \frac{M}{W_p} \qquad (8.42)$$

حيث : I_p – عزم عطالة المقطع القطبية ، وقيمته في حال المقطع الدائري :

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \qquad (8.43)$$

W_p – عزم المقاومة القطبي للمقطع وقيمته أيضاً في حال المقطع الدائري :

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16} \qquad (8.44)$$

غالباً ماتكون الغاية من تجربة الفتل هي البحث عن قيمة G في مجال حد المرونة للعينة ، لهذا وبمقارنة العلاقتين (8.40 و 8.42) وبعد الأخذ بعين الاعتبار العلاقة (8.44) نجد أن :

$$\tau = \gamma G = \frac{M}{W_p} = \frac{16\,M}{\pi d^3} \qquad (8.45)$$

ومن العلاقة (8.45) يتم إيجاد قيمة G .

وإذا كانت الغاية من تجربة الفتل معرفة قيمة زاوية الفتل φ ، عندها يمكن أن نكتب :

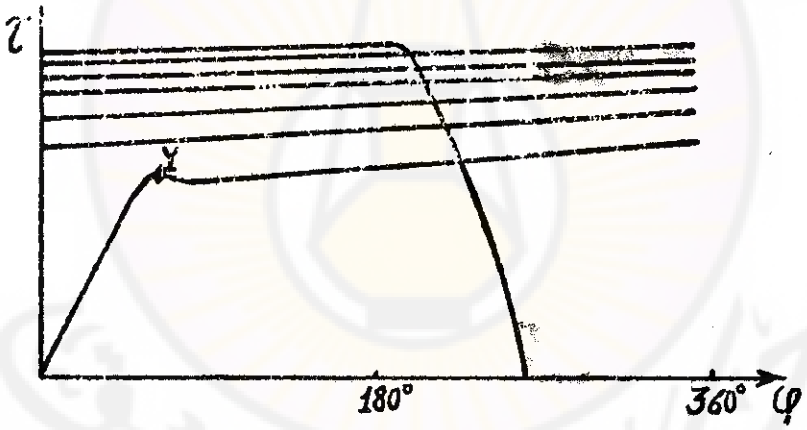
$$\tau = \gamma G = \frac{\varphi \cdot \frac{d}{2}}{L_0} G = \frac{16\,M}{\pi d^3} \qquad (8.45)$$

وعندئذ تصبح قيمة زاوية الفتل مساوية :

$$\varphi = \frac{32\,M\,L_0}{\pi d^4 \cdot G} \qquad (8.47)$$

إن اختبار الفتل يجرى عادةً على المواد الهشة حتى الانكسار ، أما المواد

اللدنة فيكتفى 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 لايكون لها حد انسياب واضح ، فيعد حد الانسياب هو $\sigma_{0,2}$ أو بالأحرى $\tau_{0,1}$ ويرسم لتجربة الفتل مخطط مماثل لمخطط الشد حيث تؤخذ فيه M بتابعية φ أو γ بتابعية φ (انظر الشكل ٨ ــ ٢٤) ، إذ يُبيِّن هذا الشكل منحني الفتل لمادة لدنة (فولاذطري) ويلاحظ من الشكل أنه حتى حد الانسياب يكون المنحني على شكل مستقيم مائل وبعد ذلك يصبح أقل ميلاً وينقاقص ميله باستمرار مقترباً من الوضع الأفقي حتى الانكسار ، كما يلاحظ أن الثهاية المحصلة للعينة تدور عدة دورات قبل أن يتم الكسر .



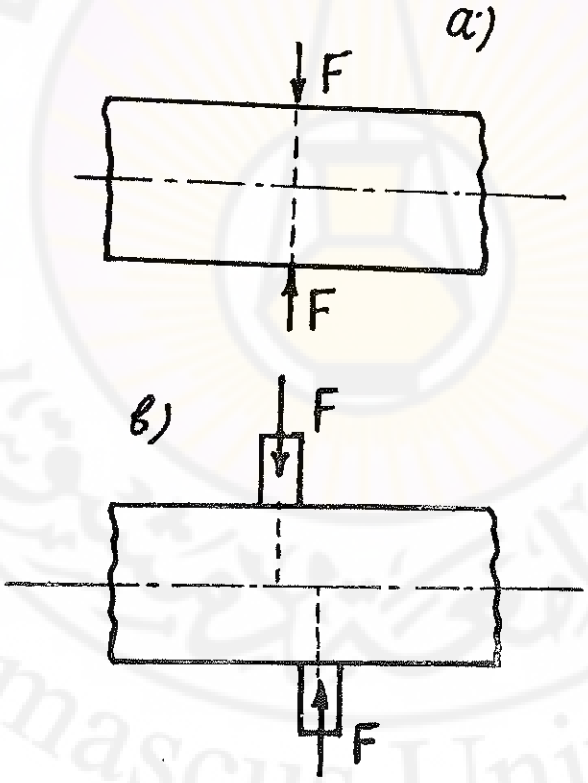
الشكل (٨ ــ ٢٤) : منحني الفتل للفولاذ الطري

٨ ــ ٥ ــ اختبار القص :

يختلف اختبار القص الستاتيكي عن الاختبارات الستاتيكية آنفة 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 مستوٍ واحد (انظر الشكل ٨ ــ ٢٥ a) وتحقيق ذلك يتطلب استعمال عُدد ذات سماكة متناهية في الصغر وهذا عملياً غير ممكن إذ أن سماكة رؤوس القص يجب ألا تقل عن حدود معينة يحددها قطر عينة الاختبار وذلك بحيث تستطيع هذه الرؤوس تحمل القوى التي يجب تطبيقها ،لهذا فان تأثير القوتين سيكون في مستويين مختلفين (انظر الشكل ٨ ــ ٢٥ b)أي



الشكل (٨ ــ ٢٥) : كيفية تطبيق قوى القص النظرية (a) والعملية (b) .

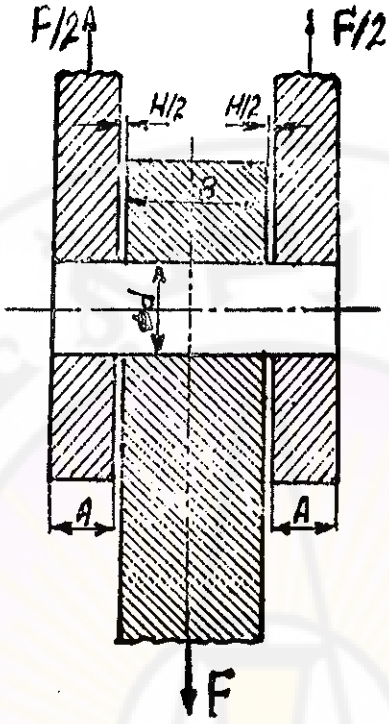
أنه بالإضافة لإجهادات القص فان العينة سوف تتأثر باجهادات انحناء أيضاً، لذلك فان الدقة المطلوبة في اختبار القص لايمكن الوصول اليها • ويكتفى عادة باستعمال تجربة القص لاختبار عينات من قطع الآلات المعرضة لاجهادات قص وفي ظروف مشابهة لظروف التجربة مثل المسامير والبراغي والتباشيم وغيرها وذلك بهدف تحديد مدى تحمل القص أو مقاومته لدى هذه العينات •

٨ ــ ٥ ــ ١ ــ إجراء الاختبار والوحدات المستنتجة

إن كل المحاولات المبذولة للحصول على إجهاد قص صافٍ (كما ذكرنا آنفاً) لم تنجح حتى تاريخه ؛ اذ أنه في جميع الأحوال لا بد أن تحدث في عينة الاختبار إجهادات شد أو ضغط أو كليهما معاً بالاضافة إلى اجهادات 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 ماهو متبع في الاختبارات الستاتيكية الاخرى •

وتتنوع في الوقت الحاضر طرق اختبار القص ولكن أكثرها شيوعاً واستخداماً هو القص المزدوج (أي تحديد جهد القص الأعظمي لعينة اسطوانية مماثلة لمسمار البرشام) وقص الثقب (أي تحديد جهد القص الأعظمي لصفيحة معدنية عند إحداث ثقب فيها بوساطة رأس ثاقب) •

ويتم الاختبار الأول (أي اختبار القص المزدوج) على آلة الشد العامة حيث يُثبت الرأس الحامل للقطعتين المتوازيتين على الرأس الثابت لآلة الشد ، اما اللسان المنزلق فتثبت نهايته على الرأس المتحرك للآلة ، ثم توضع عينة الاختبار في الثقب الذي يمتد عبر قطع رأس القص الثلاثة والذي يتناسب قطره مع قطر العينة (انظر الشكل ٨ ــ 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



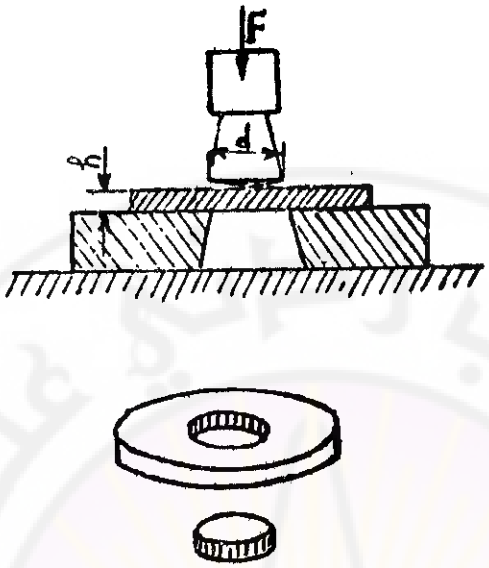
الشكل (٨ ــ ٢٦) : اختبار القص المزدوج

القص (أي الاجهاد الأعظمي للقص) بتقسيم أكبر قيمة للقوة يصل إليها التحميل على ضعف مساحة مقطع العينة ، أي أن :

$$T = \frac{F}{2A} \qquad (8.48)$$

حيث : A ــ 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 ــ ٢٧) • ويتم



الشكل (٨ ــ ٢٧) : ثقب صفيحة معدنية بالقص

في هذه الحالة كما ذكرنا سابقاتحديد 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 ــ ٢٧) نلاحظ أن المساحة المعرضة لاجهاد القص هي :

$$A = \pi d h \qquad (8.49)$$

حيث : d ــ قطر الرأس الثاقب •

h ــ سماكة الصفيحة •

وبالتالي فان إجهاد القص الأعظمي يصبح مساوياً :

$$T_s = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi d h} \qquad (8.50)$$

٨ ـ ٦ ـ اختبار القساوة :

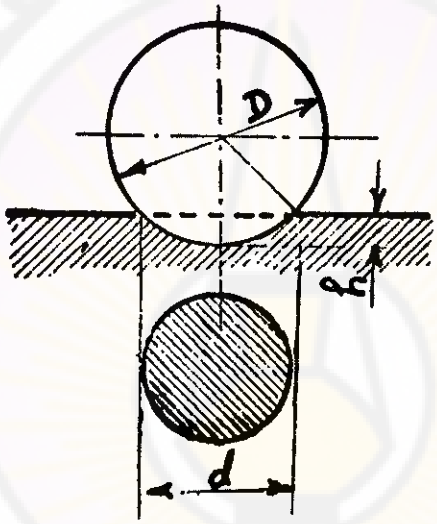
تُعرّف القساوة بصفة عامة على أنها مقاومة سطح جسم لجسم آخر أقسى منه • وتعني مقاومة الجسم الأول للثاني هنا بالمقاومة ضد الخدش أو الاختراق أو التغلغل أو الصدم • ولهذا يقسم اختبار القساوة الى قسمين رئيسين وذلك تبعاً لنوع الحمل المطبق • فاذا كان الحمل ستاتيكياً سُمي اختبار القساوة الستاتيكية، وإذا كان الحمل المطبق ديناميكياً (أي اختبار القساوة عن طريق صدم 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 للعينة أو القطعة المختبرة ثم يُحمّل بقوة معينة ، وبعد إزالة التحميل يقاس قطر انغماس الجسم في العينة أو أبعاده ، ونسبة القوة المطبقة الى سطح هذا الانغماس تعطي مقدار القساوة رقمياً • وتختلف طرق قياس القساوة عن بعضها بعضا بنوع الجسم القاسي المستعمل وشكله ومقدار القوة المطبقة على هذا الجسم ، وأهم الطرق المستعملة وعلى نطاق واسع في قياس القساوة هي : طريقة برينل ـ طريقة فيكرز ـ طريقة روكويل • وسوف نُبيّن فيما يلي الميزات الأساسية ومجالات استخدام كلٍ من هذه الطرق الثلاث :

٨ ـ ٦ ـ ١ ـ طريقة برينل :

يعتمد مبدأ هذه الطريقة على انغماس كرة من الفولاذ المقسى قطرها معلوم D وتحمل بقـوة معينة F . فبعد التحميل تنغمس الكرة الفولاذية في سطح القطعة المختبرة وتترك في هذا السطح تقعراً على شكل قطاع كروي عمقه h وقطر فتحته d (انظر الشكل ٨ ـ ٢٨) . والرقم الذي يميز قساوة القطعـة



الشكل (٨ ٢٨) : اختبار القساوة بطريقة برينل

هو النسبة بين القوة المطبقة ومساحة سطح هذا التقعر ، أي أن :

$$HB = \frac{F}{A} \qquad (8.51)$$

ويُعد السطح هو سطح قطاع كروي مساحته :

$$A = \pi D h \qquad (8.52)$$

أما عمق التقعر h فيحسب من العلاقة التالية :

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \qquad (8.53)$$

فتكون :

$$HB = \frac{2F}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)} \qquad (8.54)$$

أي أنه لحساب قيمة القساوة 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 :

١ً ــ يجب أن يكون سطحا العينة (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 الانغماس من قبل العينة بشكل كامل من جهة أخرى .

٢ً ــ إن أقطار الكرات المستعملة في طريقة برينل هي ١٠،٥،٥،٢،٢٥،١، ٦٢٥ر٠ مم . ويجب أن يتراوح قطر فتحة التقعر d بين ربع ونصف قطر الكرة D . فاذا كان ($d < 0{,}25\,D$) فان سطح الانغماس قليل التكور ، أما إذا كان ($d \geq 0{,}5\,D$) فان السطح كثير التكور وفي كل من الحالتين لا يكون متناسباً مع قيمة القساوة .

٣ً ــ يجب أن لايزيد عمق الانغماس h عن $\frac{1}{10}$ من سماكة القطعة المختبرة . وإذا تحققت العلاقة بين قطر فتحة التقعر d وقطر الكرة

$(0,25\,D < d \leqslant 0,5\,D)$ فان قيم h بالنسبة لقطر الكرة تتراوح بين $(0,015\,D < h < 0,068\,D)$، ويمكن استنتاج ذلك من العلاقة (8.53) على النحو التالي :

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{(\frac{D}{2})^2 - (\frac{d}{2})^2} = \frac{D}{2}\left[1 - \sqrt{1 - (\frac{d}{D})^2}\right] \qquad (8.55)$$

فاذا أدخلنا في العلاقة السابقة (8.55) قيم d حيث $(d_1 = 0,25\,D)$ و $(d_2 = 0,5\,D)$ فإن :

$$h_1 = \frac{D}{2}\left[1 - \sqrt{1 - (\frac{1}{4})^2}\right] = \frac{D}{2}(1 - \sqrt{\frac{15}{16}}) = 0,015\,D \qquad (8.56)$$

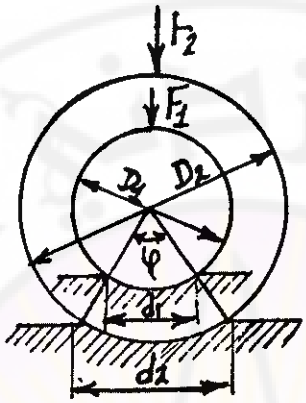
$$h_2 = \frac{D}{2}\left[1 - \sqrt{1 - (\frac{1}{2})^2}\right] = \frac{D}{2}(1 - \sqrt{\frac{3}{4}}) = 0,068\,D \qquad (8.57)$$

وعلى هذا الأساس فان سماكة العينة يجب أن لاتقل عن $0,15\,D$.

٤ً ـ إن استخدام كرات بأقطار مختلفة عند قياس القساوة يتطلب منا أن نوجد الشروط الواجب التقيد بها حتى نتمكن من مقارنة نتائج القياس حتى في حال اختلاف كلٍ من أقطار الكرات وقوى التحميل المطبقة . فاذا قمنا بقياس قساوة معدن ما باستخدام كرتين بقطرين مختلفين فانه يمكننا أن نحصل على قيم قساوة 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 ـ ٢٩) . ومن الشكل نلاحظ أن :

$$\frac{d_1}{D_1} = \frac{d_2}{D_2} = \sin\frac{\varphi}{2} \qquad (8.58)$$

وعند تساوي قيم القساوة ($HB_1 = HB_2$) 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 ــ ٢٩) : العلاقة بين F و D عند تشابه فتحتي التقعر في القطعة المختبرة

$$\frac{F_1}{D_1^2}\left[\frac{2}{\pi\left(1-\sqrt{1-\sin^2\frac{\varphi}{2}}\right)}\right] = \frac{F_2}{D_2^2}\left[\frac{2}{\pi\left(1-\sqrt{1-\sin^2\frac{\varphi}{2}}\right)}\right] \qquad (8.59)$$

ومنه نستنتج أن :

$$\frac{F_1}{D_1^2} = \frac{F_2}{D_2^2} = \ldots = \frac{F}{D^2} = \text{const} \qquad (8.60)$$

وهكذا نلاحظ أن تحقيق الشرط المتعلق بنسبة قطر الانغماس 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 آنفة الذكر بعضها ببعض طبقاً لما يلي :

$$F = \beta D^2 \qquad (8.61)$$

حيث : β – رقم يتعلق بنوع مادة القطعة المقيسة وتتراوح قيمته بين 2,5 و 30 كما هو موضح في الجدول التالي :

$F\ (kg_f)$ / D (mm)	رصاص – قصدير $F=2,5D^2$	المنيوم $F=5D^2$	نحاس – خلائط المنيوم $F=10D^2$	الخلائط الحديدية $F=30D^2$
10	250	500	1000	3000
5	62,5	125	250	750
2,5	15,625	31,25	62,5	187,5

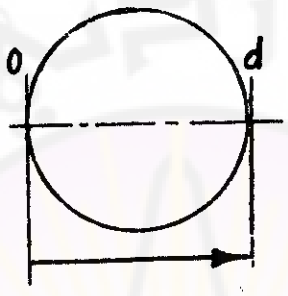
٥ً – لتسهيل عملية قياس القساوة بطريقة برينل فقد وضعت جداول خاصة تعطي قيمة القساوة HB بتابعية قطر التقعر d وذلك لكل ازدواج ممكن بين D و F حسب الجدول السابق • ونورد على سبيل المثال واحداً من هذه الجداول التجريبية الخاصة والمتوافرة حالياً وذلك عندما يكون قطر الكرة $D = 10\ mm$ والحمل المطبق $F = 3000\ kgf$ والنسبة $F/D = 30$ (انظر الجدول ٨ – ١) •

٦ً – أما قياس قطر التقعر d فيتم بوساطة 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 (٠٠١ر٠ 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 ــ ١) : واحـد من الجداول التجريبية لقيم القساوة المستنتجة بطريقة برينل وذلك عندما يكون قطـر الكـرة (D = 10 mm) والحمـل المطبـق (F = 3000 kgf) والنسبة ($F/D^2 = 30$)

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	525	523	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	396	393	390
3·10	388	385	383	380	378	375	373	370	368	366
3·20	363	361	359	356	354	352	350	347	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	249	248	246	245	244	242
3·90	241	240	239	237	236	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	156	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	106	106	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	—	—	—	—	—	—	—	—	—

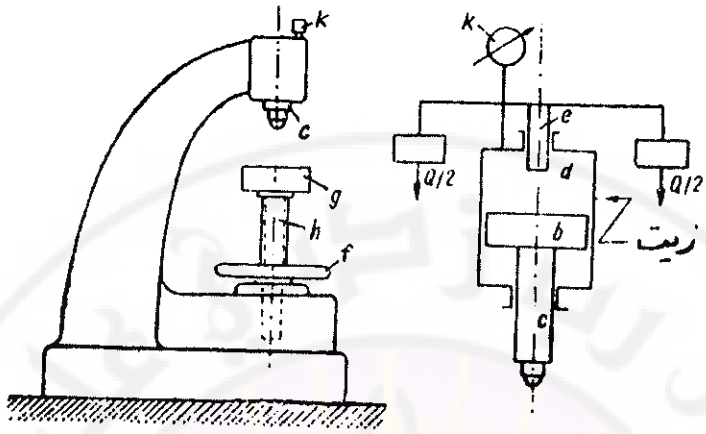
في الميكرومتر من جهة • ومن جهة ثانية نفترض أن وضع التماس هذا يمثل الصفر على الميكرومتر ثم يزلق المستقيم المذكور (أي تزلق العدسة) وذلك بتدوير لولب الميكرومتر حتى يمس دائرة التقعر في الطرف المقابل • وبهذا الشكل يكون قد قطع مسافة مقدارها قطر التقعر p (انظر الشكل ٨ ــ ٣٠) •



الشكل (٨ ــ ٣٠) : مخطط قياس قطر التقعر d في طريقة برينل .

٧ً ــ أما تطبيق الحمل اللازم ستاتيكيا (أي من الصفر وحتى قيمة معينة F بالتدريج) وترك هذا الحمل مؤثراً لفترة زمنية كافية لتشكل التقعر فانه يتم بوساطة آلة اختبار القساوة نفسها • ويتوافر في الوقت الحاضر نوعان من آلات الاختبار هذه : الأول ويعمل بالمسننات واللولب ، والثاني ويعمل هيدروليكياً ، ولكن يفضل الاختبار بالآلة الهيدروليكية وذلك لسهولة استعمالها وضبطها • ويبيّن الشكل (٨ ــ ٣١) مخطط هذه الآلة مبسطاً •وأهم أجزاء هذه الآلة هي:

الطاولة g الحاملة للقطعة المقيسة وهي قرص مستو يحمله عمود شاقولي لولبي h يمكن رفعه أو خفضه حسب الحاجة بتدوير القرص f ،والرأس الحامل للكرة المنغمسة 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 الاثقال مع القوة المراد تطبيقها •



الشكل (٨ ــ ٣١) : جهاز برينل لاختبار القساوة

٨ ــ ٦ ــ ٢ ــ طريقة فيكرز :

تم ابتكار هذه الطريقة من قبل شركة فيكرز بعد أن لوحظ أن طريقة برينل تتمتع بعدد من العيوب ، نذكر منها :

١ً ــ لاتصلح طريقة برينل في قياس قساوة الصفائح الرقيقة •

٢ً ــ لاتصلح طريقة برينل في قياس قساوة القطع التي يسبب وجود التقعرات عليها عدم امكان استعمالها بعد إجراء القياس •

٣ً ــ 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 المقساة والمستخدمة 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) .

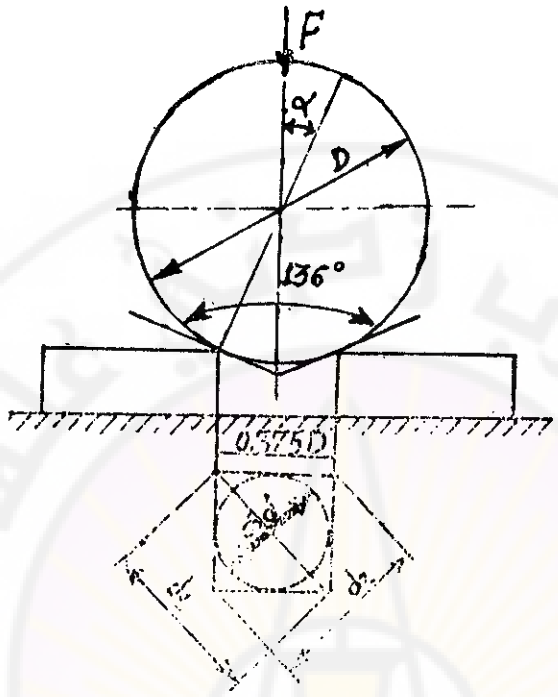
٤ً ــ إن اختيار قطر الكرة والحمل المناسب لكل نوع من أنواع الموادالمقيسة بهدف تحقيق النسبة بينقطر التقعر d وقطر الكرة D أمر يتطلب الدقة والتغيير المستمر في الكرات والأحمال .

٥ً ــ إن قياس القساوة السطحية للقطع المعدنية المقساة سطحياً ولطبقات رقيقة أمر" غير ممكن وذلك لان عمق انغماس الكرة قد يتجاوز عمق الطبقة السطحية المقساة .

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 بوساطة هرم الماس الرباعي (الذي تبلغ زاوية رأسه ١٣٦°) بشكل عمودي على سطح عينة الاختبار ثم قياس مساحة الانغماس وتقسيم الحمل على هذهالمساحة لتكون النتيجة هي رقم القساوة HV بطريقة فيكرز. أما اختيار زاويةالرأس للهرم مساويةً ١٣٦° فقد تم انطلاقاً من المبدأ التالي :

لكي تكون نتائجالقياس 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 . وانطلاقا من هذه الأسس والممثلة على الشكل (٨ ــ ٣٢) يمكن حساب الزاوية الرأسية للهرم كما يلي :

$$\frac{r}{R} = \frac{d}{D} = \sin\alpha = 0{,}375 \qquad (8.62)$$



الشكل (٨ ــ ٣٢) : العلاقة بين دائرة انغماس برينل ومربع انغماس فيكرز .

أي أن :

$$\alpha = \arcsin 0{,}375 = 22^{\circ} \qquad (8.63)$$

ومنه :

$$\beta = 2\,(90 - \alpha) = 2\,(90 - 22) = 136^{\circ} \qquad (8.64)$$

أما مساحة الانغماس S والتي تتألف من أربعة مثلثات مسقطها على مستوي عينة الاختبار على شكل مربع مساحته S' ، حيث :

$$S = \frac{S'}{\cos 22^{\circ}} \qquad (8.65)$$

وبما أن مساحة المربع من خلال وسطح قطريه ($d_m = \frac{d_1 + d_2}{2}$) هي :

$$S' = \frac{d_m^2}{2} \qquad (8.66)$$

فان مساحة الانغماس S تساوي :

$$S = \frac{d_m^2}{2 \cdot \cos 22^\circ} \qquad (8.67)$$

وعندئذ تكون القساوة السطحية للمادة وفق طريقة فيكرز مساوية :

$$HV = \frac{F}{S} = 2 \cdot \cos 22^\circ \frac{F}{d_m^2} \qquad (8.68)$$

أو أن :

$$HV = 1{,}8544 \frac{F}{d_m^2} \qquad (8.69)$$

تتمتع طريقة فيكرز بمجموعة من المزايا تميزها عن طريقة برينل ، نذكرمنها:

١ً ــ يمكن باستخدام طريقة فيكرز أن نقيس القساوات المتوسطة (التي تقاس عادة بطريقة برينل) والقساوات العالية (التي تصل قيمها الى مافوق 1000 HV) وذلك عندما تصبح طريقة برينل غير صالحة .

٢ً ــ تتراوح قوة التحميل في طريقة فيكرز بين (0,5 ÷ 120 KP) وذلك تبعاً لسماكة الطبقة السطحية المراد اختبارها وقيم القساوة المتوقع الحصول عليها .ومع كل هذا فان الدقة في تقدير القوة هنا ليست ضرورية لان ذلك لن يؤثر في قيمة القساوة التي نحصل عليها والتي لاتتعلق بمقدار القوة المطبقة .

٣ً ــ يمكن قياس القساوة السطحية للصفائح الرقيقة التي تصل سماكتها حتى (0,1 mm) .

٤ً ــ بما أن قيم القساوة لاتتعلق بمقدار القوة المطبقة فانه يمكننا اجراء قياس القساوة بجعل الحمل المطبق صغيرا وبالتالي حجم الانغماس سيكون صغيرا أيضاً وهذا يمكننا من إزالة آثار الاختبار بسهولة وذلك عندما يكون مطلوباً سطوح مصقولة للقطعة بعد اختبارها .

٥ً ــ تمكننا طريقة فيكرز من قياس قساوة السطوح المقساة الى عمق بسيط أو السطوح المغلفنة .

٦ً ــ يمكن قياس قطري الانطباع d_1 و d_2 بعد إزالة التحميل مباشرة وذلك بوساطة مجموعة عدسات ضوئية تشكل للانطباع الرباعي خيالاً مكبراً على شاشة مركبة في الجزء العلوي من الجهاز ومزودة بميكرومتر .

٧ً ــ لقد دلت التجربة على أن هناك تناسباً واضحاً في خلائط الفولاذ بين القساوة وحد المتانة ، حيث :

$$\sigma_b = (0,28 \div 0,32) \, HV \qquad (8.70)$$

لهذا كثيراً مايغني قياس القساوة عن اختبار الشد عندما لاتكون الدقة مطلوبة في تقدير حد المتانة للفولاذ .

٨ ــ ٦ ــ ٣ ــ طريقة روكويل :

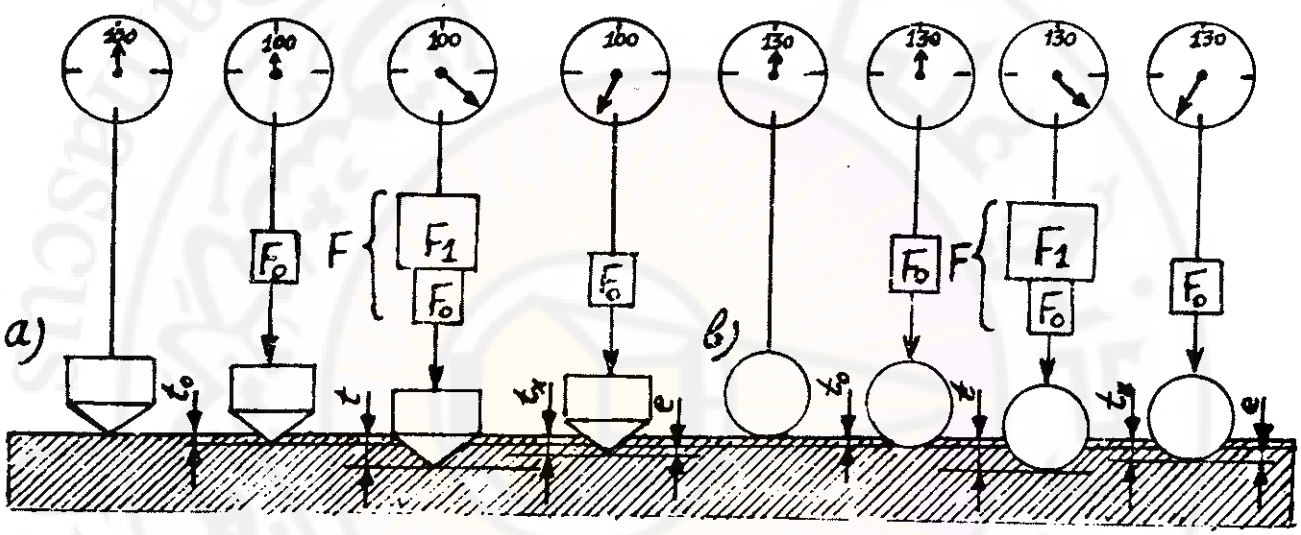
إن مايؤخذ على كلٍ من طريقتي برينل وفيكرز هو البطء في الحصول على النتائج الرقيمة ، حيث لابد بعد إجراء الاختبار من اجراء القياسات المجهرية لأبعاد

الانطباع (الانغماس) ثم حساب القساوة باستخدام العلاقات آنفة الذكر والرجوع الى الجداول الخاصة للحصول على قيمة هذه القساوة • أما طريقة روكويل فقد تخلصت من هذا العيب وذلك باعتمادها مبدأ مختلفا عن المبدأ المتبع في الطريقتين السابقتين •

إن الأجهزة المستعملة في قياس القساوة 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 عكسا مع القساوة ، لذلك فقد زودت أجهزة قياس روكويل بعدادات خاصة تعطي مباشرة أرقاما تتناسب عكساً مع عمق الانغماس وطرداً مع قساوة القطعة المقيسة • ويُبيِّن الشكل (٨ـ٣٣) مراحل استخدام هذه الطريقة في قياس القساوة والتي تتم على النحو التالي :

١ً ـ يستعمل كجسم للانغماس إما كرة فولاذية مقساة قطرها $\frac{1}{16}$ انشاً وبحمولة كلية مقدارها (100 KP) عند قياس القساوات الصغيرة وتأخذ القساوة المقيسة في هذه الحالة الرمز HRb ، أو يستعمل مخروط من الماس زاويته ١٢٠° وبحمولة كلية مقدارها (150 KP) عند قياس القساوات الكبيرة وتأخذ القساوة 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 .

٢ً ـ 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 ، ويعد العمق الذي ينغرز اليه الجسم بعد التحميل الاولي t_0 هو بداية القياس ويُعير عداد القياس (القرص المدرج) بحيث



الشكل (٨ ــ ٣٣) : مراحل استعمال طريقة روكويل في قياس القساوة وذلك باستخدام المخروط (a) أو الكرة (b) .

يشير مؤشره الى الرقم (100) في حال استخدام المخروط وللرقم (130) في حال استخدام الكرة .

٣ً – 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) .

٤ً – 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 العداد ليعطي مباشرة أرقاماً 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 الحدين هو ٢ر٠مم في حالة استخدام المخروط و ٢٦ر٠ مم في حالة استخدام الكرة ، أيأن كل تدريج على لوحة العداد يعادل انغماساً قدره ٠٠٢ر٠ مم .

٥ً – مما سبق نستنتج أنه إذا بلغ عمق الانغماس عند استخدام المخروط ٢ر٠ مم (أو ٢٦ر٠ مم عند استخدام الكرة) فان العداد سوف يشير الى الصفر أما إذا عاد رأس الانغماس الى النقطة t_0 فان 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 المبيّن على الشكل (٨ – ٣٣) فان العداد

سوف يشير الى الرقم الذي يكمل e الى 100 (أو إلى 130) والرقم المكمل هذا يتناسب طرداً مع قساوة القطعة • وهذا الرقم هو رقم نسبي لا يميز بوحدة معينة ويمكن حسابه على النحو التالي :

في حال المخروط :

$$HRc = 100 - \frac{e\,(mm)}{0{,}002\ (mm)}$$

في حال الكرة :

$$HRb = 130 - \frac{e\,(mm)}{0{,}002\ (mm)}$$

تمتاز طريقة روكويل كما ذكرنا بالسرعة وعدم الحاجة للحسابات أو الجداول المساعدة ، كما أنه باستعمال أحمال أولية ومتسة 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 آنفة 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 وفيكرز (انظر الجدولين ٨ ــ ٢ و ٨ ــ ٣) ، حيث يظهر هذان الجدولان المقارنة التقريبية بين قيم القساوة المستنتجة بالطرق الثلاث ذلك لأنه لم تتوافر حتى الآن العلاقات الرياضية المطلقة للتحول 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 .

روكويل – كرة – (100 kg f)	روكويل – كرة – (15 kg f)	روكويل – كرة – (30 kg f)	روكويل – كرة – (45 kg f)	طريقة برينل
HRB	15T	30T	45T	HB
100	93.0	82.0	72.0	201
99	92.8	81.5	71.0	195
98	92.3	81.0	70.0	189
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	56.0	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	108
68	82.7	62.0	41.5	107
67	82.3	61.5	40.5	106
66	82.0	60.6	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	80.5	57.0	34.5	96
60	80.3	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

روكويل – كرة – (100 kg f)	روكويل – كرة – (15 kg f)	روكويل – كرة – (30 kg f)	روكويل – كرة – (45 kg f)	طريقة برينل
HRB	15T	30T	45T	HB
55	78.7	53.0	28.0	89
54	78.3	52.5	27.0	87
53	78.0	51.5	26.0	86
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	66.5
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	26.5	--	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 ــ ٣) : مقارنة القيم التقريبية للقساوة المستنتجة بالطرق الثلاث (روكويل ــ برينل ــ فيكرز) .

روكويل ــ مخروط (150 kg f)	روكويل ــ مخروط (60 kg f)	روكويل ــ مخروط (15 kg f)	روكويل ــ مخروط (30 kg f)	روكويل ــ مخروط (45 kg f)	طريقة برنيل	طريقة فيكرز
HRC	HRA	15N	30N	45N	HB	HV
80	92.0	98.7	92.0	87.0	—	1870
79	91.5	98.3	91.5	86.5	—	1790
78	91.0	98.0	91.0	85.6	—	1710
77	90.5	97.8	90.5	84.5	—	1630
76	90.0	97.6	90.0	83.5	—	1560
75	89.5	97.2	89.0	82.5	—	1480
74	89.0	97.0	88.5	81.6	—	1400
73	88.5	96.8	88.0	80.5	—	1320
72	88.0	96.5	87.0	79.5	—	1250
71	87.0	96.2	86.5	78.5	—	1160
70	86.5	96.0	86.0	77.5	—	1080
69	86.0	95.7	85.0	76.5	—	1000
68	85.5	95.3	84.5	75.5	—	940
67	85.0	95.0	83.5	74.5	—	890
66	84.5	94.5	83.0	73.0	—	850
65	84.0	94.0	82.0	72.0	—	820
64	83.5	93.8	81.0	71.0	—	790
63	83.0	93.5	80.0	70.0	—	760
62	82.5	93.0	79.0	69.0	—	740
61	81.5	92.5	78.5	67.5	—	715
60	81.0	92.0	77.5	66.5	615	695
59	80.5	91.8	76.5	65.5	600	675
58	80.0	91.3	75.5	64.0	590	655
57	79.5	91.0	75.0	63.0	575	635
56	79.0	90.5	74.0	62.0	560	620
55	78.5	90.0	73.0	61.0	550	600
54	78.0	89.5	72.0	59.5	535	580
53	77.5	89.0	71.0	58.5	520	560
52	77.0	88.5	70.5	57.5	510	545
51	76.5	88.0	69.5	56.0	500	530
50	76.0	87.5	68.5	55.0	485	515
49	75.5	87.0	67.5	54.0	470	500
48	74.5	86.5	66.5	52.5	460	485
47	74.0	86.0	66.0	51.5	450	470
46	73.5	85.5	65.0	50.5	437	458
45	73.0	85.0	64.0	49.0	426	446
44	72.5	84.5	63.0	48.0	415	435
43	72.0	84.0	62.0	46.5	404	424
42	71.5	83.5	61.5	45.5	393	413
41	71.0	83.0	60.5	44.5	382	403
40	70.5	82.5	59.5	43.0	372	393
39	70.0	82.0	58.5	42.0	362	383
38	69.5	81.5	57.5	41.0	352	373
37	69.0	81.0	56.5	39.5	342	363
36	68.5	80.5	55.5	38.5	332	353
35	68.0	80.0	55.0	37.0	322	343
34	67.5	79.5	54.0	36.0	313	334
33	67.0	79.0	53.0	35.0	305	325
32	66.5	78.5	52.0	33.5	297	317
31	66.0	78.0	51.5	32.5	290	309
30	65.5	77.5	50.5	31.5	283	301
29	65.0	77.0	49.5	30.0	276	293
28	64.5	76.5	48.5	29.0	270	285
27	64.0	76.0	47.5	28.0	265	278
26	63.5	75.5	47.0	26.5	260	271
25	63.0	75.0	46.0	25.5	255	264
24	62.5	74.5	45.0	24.0	250	257
23	62.0	74.0	44.0	23.0	245	251
22	61.5	73.5	43.0	22.0	240	248
21	61.0	73.0	42.5	20.5	235	241
20	60.5	72.5	41.5	19.5	230	236

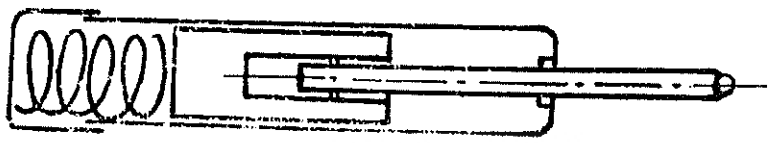
الاختبارات الديناميكية

٨ ــ ٧ ــ 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 مايميز هذه الطرق هو بساطة الاجهزة المستخدمة وسهولة استعمالها والسرعة في إجراء الاختبار • ويمكن تصنيف طرق القساوة الديناميكية الى مجموعتين :

١ً ــ 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) . ويُجرى الاختبار وفق طريقة غريفن باستخدام المطرقة المبينة على الشكل (٨ ــ 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 ــ ٣٥) •

أما إجراء الاختبار وفق طريقة بولدي فيتم أيضاً باستخدام مطرقة بولدي وهي جسم اسطواني ثبتت في نهايته كرة فولاذية مقساة (انظر الشكل ٨ ــ ٣٦)، وينزلق داخل الجسم طولياً لسان متحرك ؛ يفصله عن السطح العلوي للكرة



الشكل (٨ ــ ٣٤) : رسم تخطيطي لمطرقة غريفين

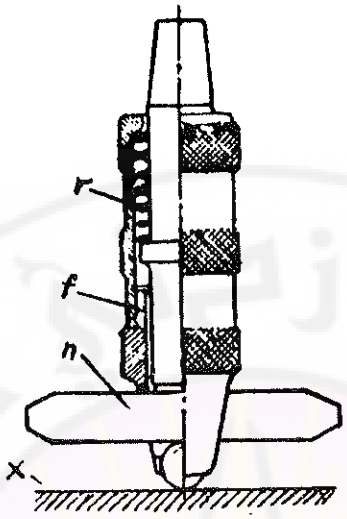


الشكل (٨ ــ ٣٥) : العلاقة بين قيم القساوة وقطر الانغماس عند استخدام مطرقة غريفن

ثقب يخترق الجسم الاسطواني عرضياً توضع فيه عينة مقارنة n معروفةالقساوة. وعند وضع هذه الأداة عمودياً على سطح العينة المراد اختبارها x والطرق بسطرقة 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 :

$$\frac{HB_x}{HB_n} = \frac{d_n^2}{d_x^2} \qquad (8.71)$$

٢ً ــ المجموعة الثانية : وتعتمد مجموعة الطرق هذه في مبدئها على كون المادة الأكثر قساوة هي الأكثر مرونة (مبدأ طريقة روكويل) . لذلك إذا ألقينا بالكرة

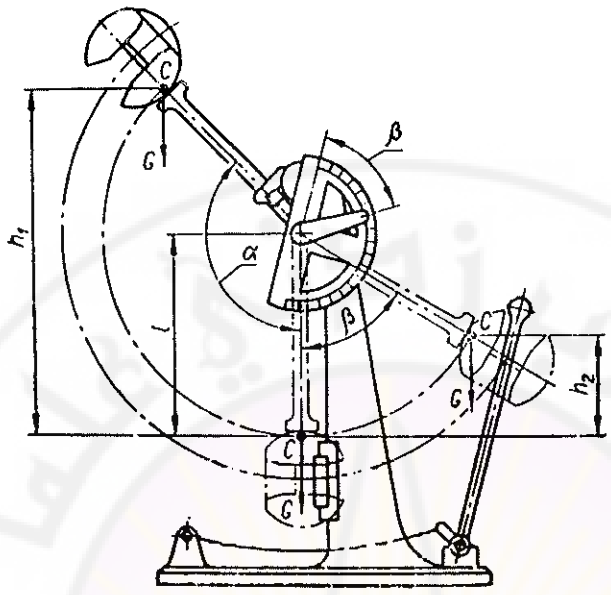


الشكل (٨ ــ ٣٦) : رسم تخطيطي لمطرقة بولدي

(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 ــ ٨ ــ اختبار الصدم :

لدراسة مقدرة المادة على مقاومة الصدم التي يمكن أن تتعرض لها أثناء



الشكل (٨ ــ 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 . ويُستعمل لاجراء هــذا الاختبار مايُسمى آلة الصدم المبيَّنة على الشكل (٨ ــ ٣٧) . ويُبين الشكل (٨ ــ ٣٧) رسماً تخطيطياً لهذه الآلة وكيف يتم توجيه الصدمة على عينة الاختبار بوساطــة مطرقة نواسية ذات ثقــل معين G ومرفوعة الى ارتفاع أولي h_1 وتترك المطرقــة تهبط بفعل ثقلها وتنوس حول محور دورانها وعندما تصل الى الوضع الشاقــولي تصطدم أداتها القاطعــة (المزود بها رأس المطرقة) بالعينة من الــوجه المقــابل للوجه الموجــود فيه الحز (أو الثلم) فتحني العينة وتكسرها وتستمر بالنوسان إلى الجهــة الأخرى ولكن الى ارتفــاع h_2 أقل من h_1 (انظــر الشكل ٨ ــ ٣٧) . وعندها فان العمل المصروف على كسر العينة يمكن حسابه من فرق

هذين الارتفاعين ووزن المطرقة من العلاقة التالية :

$$W = G (h_1 - h_2) \quad \ldots \ldots \quad (8.72)$$

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 فان 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 قيمةالزاوية β فان قياس هذه الزاوية يتم أثناء الاختبار بوساطة مؤشر احتكاكي يتحرك أمام قوس مدرجة ويدوره ذراع المطرقةأثناء نوساته فيالشوط الاول ليتركهعند أعلى نقطة يصلها في الجانب الآخر (انظر الشكل ٨ ــ ٣٧) .

فاذا قسمنا العمل الكلي المحسوب بالعلاقة (8.73) على مساحة مقطع العينة الصافي عند الحز (أو الثلم) فاننا نحصل على مايُسمى العمل النوعي للصدم (أو مايُسمى عادةً متانة الصدم للمادة المختبرة) وذلك بالعلاقة :

$$a_k = \frac{W}{A} \left(kg_f \cdot m/cm^2 \right) \quad (8.74)$$

تتعلق قيمة العمل النوعي للصدم (متانة الصدم) بعوامل كثيرة ، نذكر منها: شكل العينة وشكل الحز (أو الثلم) وأبعاد الحز (بخاصة نصف قطر تحدب سطحه الداخلي) وسرعة الصدم . ولهذا فان 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 :

$$a_k = a_{k1} + a_{k2} \qquad (8.75)$$

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 انكسارالعينة بشكل كامل•

ولهذا فانه لايتم 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 لايتعلق 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 للماده • وعلى هذا الأساس فان اختيار شكل الحز وأبعاده للعينة نفسها يلعب دوراً حاسماًفي الحصول على قيم مميزة ومعقـولة وقابلة للمقارنة مع قيم أخرى •

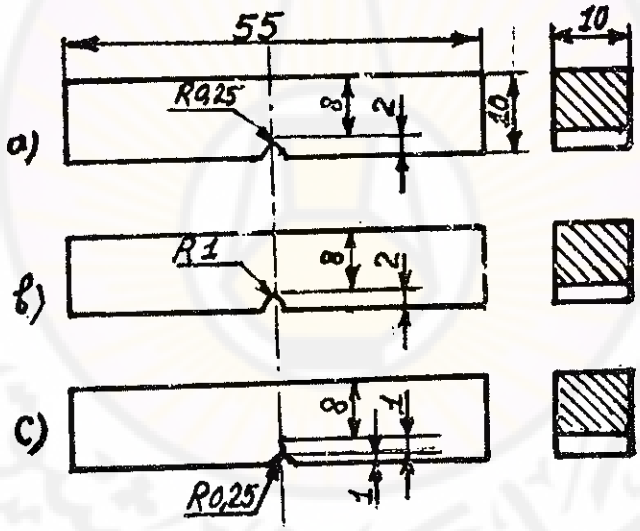
٨ – ٨ – ١ – اختيار العينات المستخدمة في اختبار الصدم :

يتنـوع شكل العينات المستخدمة وأبعادها في اختبار الصدم ، ولكن أكثر العينات شيوعاً واستخداماً في هذا الاختبار هي تلك العينات التي تُعد وفق أحـد النماذج الثلاثة التالية :

١ً – نموذج تشاربي(Charpy) :وتكون أبعاد العينة المعـدة وفق هـذا النموذج مساوية (10 × 10 × 55 mm) وتحتوي على حز (أو ثلم) على شكل V يبلغ عمقه (2 mm) ونصف قطر تحـدب سطحه الداخلي(P = 0,25 mm)•وتعد هذه العينة عادةً وفق المواصفات المعروفة (انظر الشكل ٨–٣٨ a) •

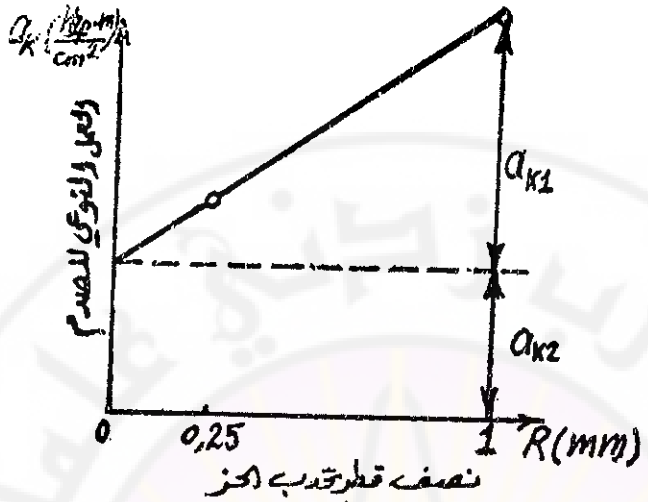
٢ً ــ نموذج إيزود (Izod) : وتكون أبعاد العينة المعدة وفق هذا النموذج مساوية (55 mm × 10 × 10) وتحتوي على حز على شكل U يبلغ عمقه (2 mm) ونصف قطر تحدب سطحه الداخلي (R = 1 mm) . • وتعد هذه العينة عادةً وفق المواصفات المعروفة (انظر الشكل ٨ ــ ٣٨ b) •

٣ً ــ النموذج الحديث : وتكون أبعاد العينة المعدة كما في النموذجين السابقين مساوية (55 mm × 10 × 10) وتحتوي على حز على شكل V يبلغ عمقه (1 mm) ونصف قطر تحدب سطحه الداخلي (R = 0,25 mm) ويتم في هذه العينة إنماء تشقق تعبي وذلك باستخدام آلات اختبار التعب أو على آلات اهتزاز تعد خصيصاً لهذه الأغراض (انظر الشكل ٨ ــ ٣٨ c) •



الشكل (٨ ــ ٣٨) : نماذج العينات المستخدمة في اختبار الصدم.

إن إنماء التشقق التعبي 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 ــ ٣٩) : علاقة العمل النوعي للصدم بنصف قطر تحدب الحز .

ذلك لأن العمل النوعي في هذه الحالة يصرف على انتشار التشقق فقط .

وعلى هذا الأساس وباختبار عينات ذات أنصاف أقطار تحدب للحزوز مختلفة (مثلاً من أجل $R = 1\ mm$ و $R = 0{,}25\ mm$ وحمل قيم العمل النوعي للصدم على المخطط المبين على الشكل (٨ ــ ٣٩) واستخدام طريقة التقريب الخارجي (extrapoltion) يمكننا أن نحصل على قيمة العمل النوعي للصدم من أجل ($R = 0$) .

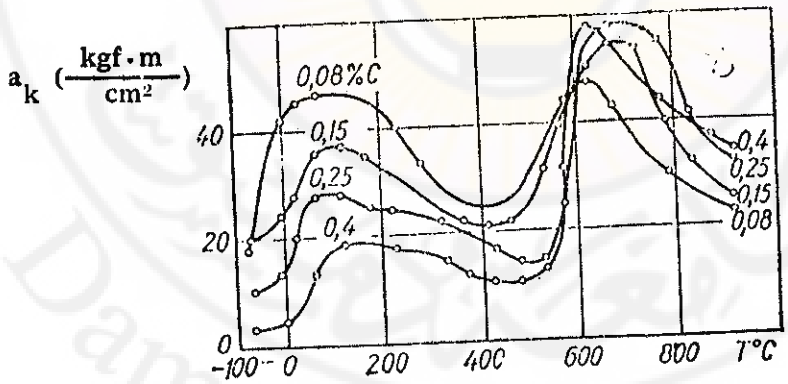
٨ ــ ٨ ــ ٢ ــ مجالات استخدام نتائج اختبار الصدم :

على الرغم من كثرة استخدام اختبار الصدم في تقويم مقاومة الصدم عند المواد المختلفة ، وعلى الرغم من توافر قيم كثيرة لمتانة 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 :

١ً ــ 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 •

٢ً ــ 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•

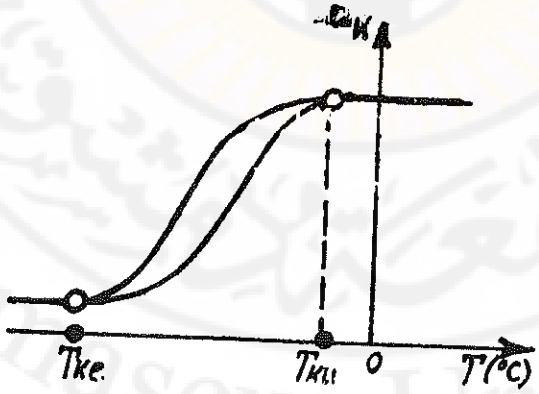
٣ً ــ اختبار مدى صلاحية المادة للاستعمال في صنع قطع الآلات أو عناصر الإنشاءات التي تعمل في درجات الحرارة المرتفعة أو السالبة • فلقد تبين أن قيم متانة الصدم تعد أساسا في عملية قبول أو رفض المادة التي ستستخدم في قطع الآلات أو عناصر الانشاءات التي تتعرض لأحمال ديناميكية وتستغل في درجات حرارة معينة • فمثلاً يجب أن لاتقل متانة الصدم عن ($8 \div 10\ kgf \cdot m/cm^2$)



الشكل (٨ ــ ٤٠) : متانة الصدم للفولاذ الكربوني منخفض نسبة الكربون في درجات الحرارة المرتفعة والسالبة .

وذلك لجميع أنواع الفولاذ التي تستغل في درجة الحرارة العادية وتتعرض لحمل ديناميكية • أما عند ارتفاع درجة الحرارة الى مجال معين أو عند انتقالها الى مجال معين آخر فان بعض أنواع الفولاذ الكربوني (مثلا) تفقد اللدونة جزئياً أو كلياً •

ويُبين الشكل (٨ ــ ٤٠) أن الفولاذ الكربوني منخفض نسبة الكربون يفقد جزءاً من لدونته في المجال الحراري مابين (200 ÷ 550 °C) مما يسبب 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 ــ ٤١) • وعلى هذا الأساس فان الهدف من اختبارات الصدم في درجات الحرارة السالبةللمعادن والخلائط المعدنية ينحصر بصفة عامة في تحديد درجة الحرارة(T_{ku}) التيتبدأ 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 ــ ٤١) • وتعد طريقة الكسر بالصدم هذه أفضل طرق الاختبار واسرعهاالايجاد



الشكل (٨ ــ ٤١) : علاقة متانة الصدم بدرجة حرارة الاختبار

هاتين النقطتين ؛ حيث يصنع عـدد 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 الحامـل الخاص في الآلـة وصدمها ، صغير بشكل لايسمح بارتفاع يذكر في درجات حرارة العينة وهذه حسنة من حسنات هذه الطريقة تجعلها أصلح من غيرها من الطرق في مثل هذه المجالات .

٨ ـ ٩ ـ اختبار التعب :

إن الاجهادات التي تتعرض لها قطـع الآلات والانشاءات بمختلف أنواعهـا وأشكالها نادراً ماتكون مجرد إجهادات ستاتيكية بسيطة بل غالباً ماتكون هـذه الاجهادات متغيرة أثناء العمل في النوع أو المقدار أو في كليهما معـاً. وقد تبيّن أن بعض قطع الآلات المعرضة لإجهادات متغيرة المقدار غالباً ماتتكسر بعد فترة من العمل تتعلق بالحدود التي تتغير ضمنها هذه الاجهادات ، وعلى الرغم من كون أكبر هذه الاجهادات لايتجاوز حـد المرونة للمادة المصنوعة منها هذه القطع . ولقـد سُميّت 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 محـاور عجلات القاطرات والمصنعة بعامل أمان كبير بالنسبة لمقاومتها للشد ، لاتلبث بعـد فترة معينة من العمل أن تتكسر دون أن تترك أثراً واضحاً للانفعـال اللدن . وقد أثبت فولر من خلال العديد من التجارب التي أجراها على مواد مختلفة أن لكـل مادة من المواد المستعملة في الانشاءات المعدنية حـداً معيناً من الإجهادات المتغيرة أو الديناميكية تستطيع المادة تحمله وتحمل مادونه من الاجهادات دون أن تتكسر ـ أي دون أن تتعب ،وسمي هذا الاجهاد حـد التعب أو حـد الصمود لكونه

الحـد الفاصل بين التعب والصمود ، فما دون هذا الحد من الاجهادات ،تستطيع المادة تحمله الى اللانهايـة من عـدد مرات التحميل أو الاجهاد ، ومافوق هذا الحد سوف يسبب للمادة تعباً وانكساراً وذلك بعد عـددٍ من مرات التحميـل يتعلق بمقدار الاجهاد •

والغاية الأساسية من اختبارات التعب هي من جهـة معرفـة حـد الصمود للمادة المعنيـة ومن جهـة أخرى معرفة عمر القطعة المصنوعة من هذه المادة فيمـا لو حمّلت باجهـاد ما أكبر من حد الصمود ، وكل هذه القيم يتم الحصول عليها بسهولة بانشاء مايُسمى منحني فولر للمادة • لذلك فان الهـدف الرئيس مـن اختبارات التعب غالباً مايكون هو إنشاء هذا المنحني •

وقبل أن نبدأ بدراسة طريقة فولر وكيفية انشاء منحني فولر تجريبيا لا بـد من التعرف على أنواع الاجهادات الترددية التي تؤدي عادة الى تعب المادة وأنواع الآلات التي تقـوم بتوليد هذه الأنواع المختلفة من الاجهادات الترددية •

٨ ـ ٩ ـ ١ ـ الاجهادا ت الترددية :

تُعرّف الاجهادات الترددية على أنها الاجهادات الدورية التي تتبدل قيمهـا بين حـد أعظمي وحد أصغري ، ويكون هذا التبدل إما منتظمـاً أو عشوائياً • ويوضح الشكل (٨ ـ ٤٢) المزايا الأساسية للاجهـاد الترددي وذلك عندما يكون تغير هذا الاجهاد تغيراً منتظماً ، حيث يمكننا من هذا الشكل أن نستنتج معنىالقيم التالية :

σ_{max} ـ المقدار الجبري لأكبر اجهاد ترددي خلال دورة التحميل الواحدة •

σ_{min} ـ المقدار الجبري لأصغر اجهاد ترددي خلال دورة التحميل الواحدة •

σ_s ـ وهي نصف مجموع σ_{max} و σ_{min} ، حيث :

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \qquad (8.76)$$

وتدعى القيمة الوسطى للاجهاد الترددي (أو إجهاد الشد الوسطي) •

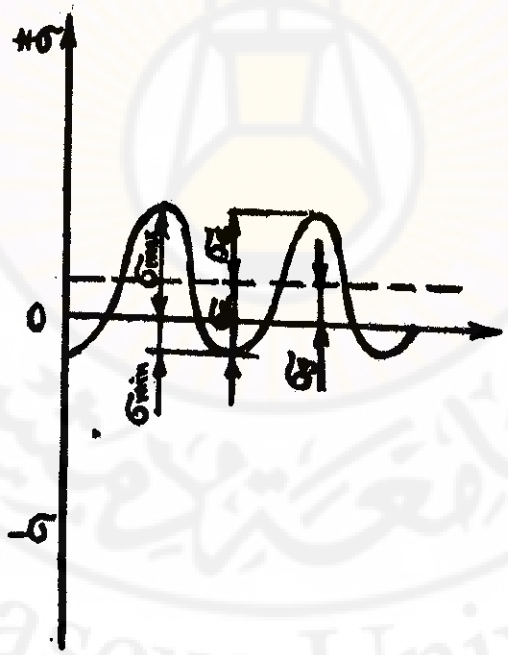
σ_a – وهي نصف الفرق بين σ_{max} و σ_{min}

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \qquad (8.77)$$

وتُسمى سعة الاجهاد الترددي •

من هنا نستنتج أن :

$$\sigma_{max} = \sigma_s + \sigma_a \quad ; \quad \sigma_{min} = \sigma_s - \sigma_a \qquad (8.78)$$



الشكل (٨ – ٤٢) : مزايا الاجهاد الترددي الأساسية

R – وهي النسبة بين σ_{min} و σ_{max} ، حيث :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \qquad (8.79)$$

وتدعى بمعامل اللاتناسق لدورة التحميل . فعندما تكون ($R = -1$) فان دورة التحميل متناسقة وعندها تكون (انظر الشكل ٨ – ٤٣ a) :

$$\sigma_a = \sigma_{max} = -\sigma_{min} \qquad (8.80)$$

$$\sigma_s = 0$$

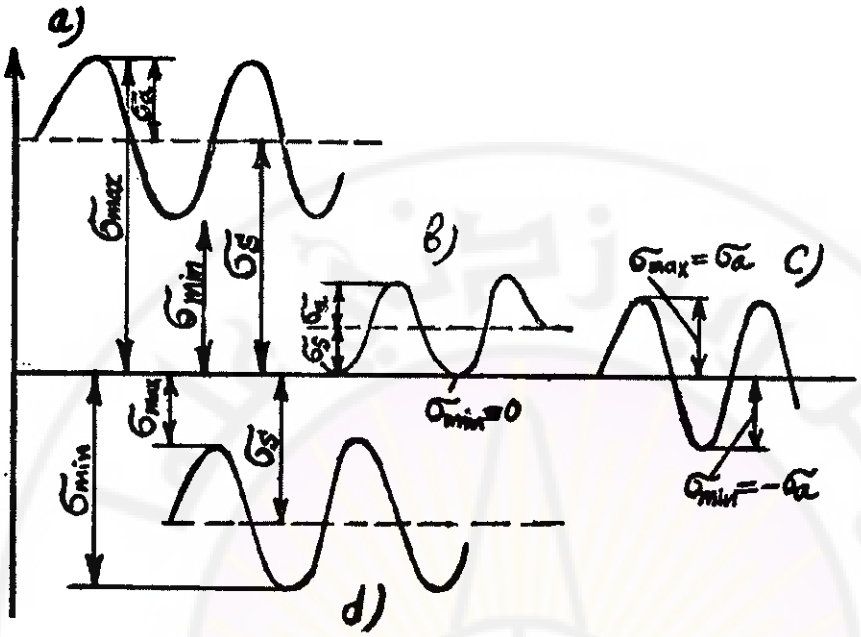
وهذا يعني أن دورة التحميل المتناسقة هي الدورة التي يكون فيها الاجهاد الأعظمي والأصغري متساويين بالقيمة المطلقة ولكنهما مختلفين بالاشارة .

وهناك حالة خاصة من حالات دورة التحميل اللاتناسقية تدعى بدورةالتحميل النبضية وذلك عندما يكون الاجهاد الاصغري σ_{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 بدوراتالتحميل المتشابهة ، وعندها فان النسبة بين الاجهادات الاعظمية لهذه الدورات تساوي النسبة بين اجهاداتها الوسطى والنسبة بين سعات اجهادها ، أي أن :

$$\frac{\sigma'_{max}}{\sigma''_{max}} = \frac{\sigma'_s}{\sigma''_s} = \frac{\sigma'_a}{\sigma''_a} \qquad (8.81)$$



الشكل (٨ ــ 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 :

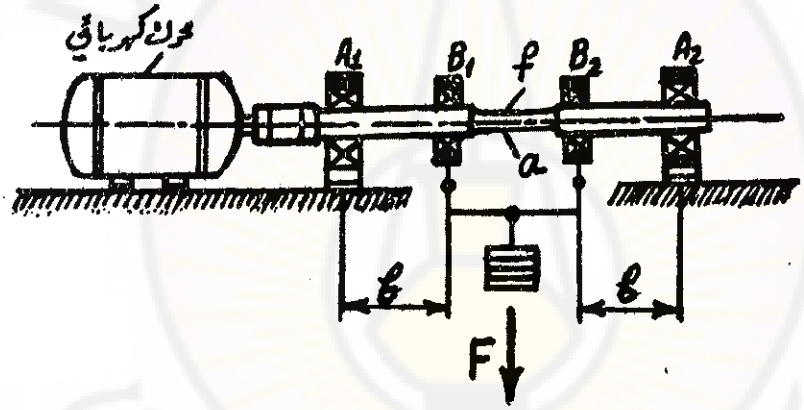
$$R' = \frac{\sigma'_{min}}{\sigma'_{max}} = \frac{\sigma'_{max} - 2\sigma'_a}{\sigma'_{max}} = 1 - 2\frac{\sigma'_a}{\sigma'_{max}}$$

$$= 1 - 2\frac{\sigma''_a}{\sigma''_{max}} = R'' \qquad (8\cdot82)$$

٨ ــ ٩ ــ ٢ ــ توليد الاجهادات الترددية (آلات اختبار التعب) :

إن آلات اختبار التعب كثيرة ومتنوعــة ولكن أكثرها استعمالاً هي تلك الآلات التي تعمل باحــدى الطريقتين التاليتين :

الطريقة الأولى : وتسمى طريقة الانحناء الدوراني ، ويتم في هذه الطريقة تثبيت العينة أفقياً على آلة الاختبار من نهايتها وباستعمال محامل دحروجيةوتحميلها عند منتصفها في نقطــة أو نقطتين متساويتي البعد عن نقطتي التثبيت ، بثقل محمول على محامل دحروجية أيضاً (انظر الشكل ٨ ــ ٤٤) .



الشكل (٨ ــ ٤٤) : آلة اختبار على التعب بطريقة الانحناء الدوراني

وتدور العينة بمحرك كهربائي ، فيتولد في العينة عزم انحناء مقداره بينقطتي التحميل B_1 و B_2 :

$$M = b \cdot F \qquad (8.83)$$

وتتولد في العينة اجهادات شد في نصفها السفلي واجهادات ضغطفينصفها العلوي ، وتكون القيمةالعظمى لكلٍ من هذين الاجهادين هي المؤثرة فيالمولدين

العلوي f والسفلي a وقيمة كل منهما :

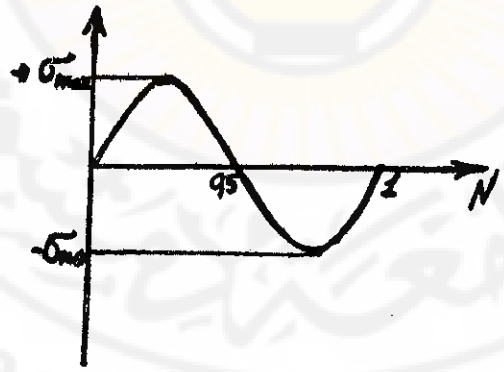
$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} \qquad (8.84)$$

وأثناء الدوران يكون تغير الاجهاد في كل مولد من مولدات سطح العينة الاسطوانية تغيراً جيبياً ، أي أن :

$$\sigma = \sigma_{max} \cdot \sin 2\pi N \qquad (8.85)$$

ويُبيِّن الشكل (٨ ــ ٤٥) تغير الاجهاد في المولد الجانبي للعينةوالموجود مع محورها في مستوٍ أفقي واحد عندما تدور العينة دورة كاملة . وتشيرالاشارة السالبة المبينة على الشكل إلى أن الاجهاد هو إجهاد ضغط .

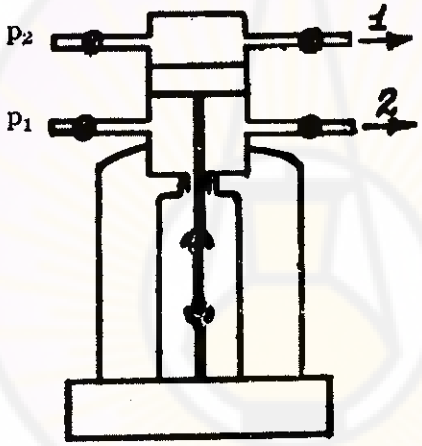
ويمكن اجراء الاختبار بتثبيت العينة من احدى نهايتيها وتحميلها من نهايتها الأخرى بدلاً من تحميلها في وسطها وفي هذه الحالة يجب إعطاء العينة شكلاً خاصاً بحيث تكون محتوية على اختناق لجعل الاجهاد أعظميا عند ذلك الاختناق كيلا يتم الكسر عند نقطة التثبيت . وعدد الدورات في آلات الانحناء الدوراني



الشكل (٨ ــ ٤٥) : تغير الاجهاد في المولد الجانبي للعينة المختبرة بطريقة الانحناء الدوراني .

غالباً مايكون بين ١٠٠٠ و ٣٠٠٠ دورة في الدقيقة (أي أن التردد الاعظمي الـذي يمكن أن تدور به العينة هو ٥٠ هرتزاً) . وتتم مراقبة تردد العينة أثناء الاختبـار بوساطـة جهازقياس تردد خاص يوصل مع المحرك الكهربائي.

الطريقة الثانية : وهي طريقة الشد والضغط بالاتجاه الطولي للعينة،والآلات المستعملة لهذه الغاية كثيرة ومتنوعـة فمنها الكهربائية ومنها الهيدروليكية والتي تشبه إلى حـدٍ كبير آلة الشد العامة التي سبق التعرف عليهـا ، إلا أن المكبس الهيدروليكي في آلة الشد ــ ضغط هو مكبس ثنائي الاتجاه أي يُضغط السـائل في كلٍ من نهايتي الاسطوانة بالتناوب . ويُبيِّن الشكل (٨ ــ٤٦) مبدأ عمـل



الشكل (٨ ــ ٤٦) : آلة هيدروليكية للاختبار على التعب بطريقة الشد ــ ضغط.

هذه الآلة ، حيث عندما يُضغط السائل (الـزيت) إلـى القسم السفلي مـن الاسطوانة ــ أي تحت قرص المكبس وبضغط p_1 تكـون القـوة المؤثرة في العينة هي قـوةشـد ومقدارها :

$$F = p_1 \cdot A \qquad (8.86)$$

حيث : A ــ 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 جيبياً على غرار مارأيناه في الشكل (٨–٤٥).

أما إذا جعلنا أحد الضغطين ثابتاً بشكل مستمر أثناء تغير الضغط الآخر فان تغير الاجهاد سوف يبقى تغيراً جيبياً 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 جيبي سعته σ_a . ولقد تم استنباط العلاقات الرياضية لهذه الإجهادات في البند السابق.

على الرغم من الاستخدام الواسع لطريقتي الاختبار آنفتي الذكر على التعب ، إلاّ أن هناك مجموعة من العيوب والصعوبات في هاتين الطريقتين ، نذكر منها :

١ً – 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) .

٢ً – يجري اختبار التعب عادةً حتى حصول التصدع الكامل للعينة وانكسارها ويتم إنشاء منحني فولر على هذا الأساس ، إلاّ أن التصدع التعبي (وكما سنرى 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 .

٣ً ـ هناك صعوبة بالغة في كل من تحضير عينات نظامية وفق المواصفات المعروفة وفي تثبيت هذه العينات في آلات الاختبار آنفة الذكر لاختبارها على التعب .

ولتلافي بعض هذه الصعوبات والعيوب قمنا بابتكار 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 :

١ً ـ اختبار عينات معدة وفق نماذج تشاربي وإيزود وعينات كبيرة ووصلات لحامية على التعب وإنشاء منحنيات فولر لها .

٢ً ـ إنما شقوق تعبية ذات أطوال محددة في عينات تشاربي وإيزود وذلك بهدف استخدام هذه العينات المحتوية على شقوق تعبية فيما بعد في تحديد كلٍ من متانة الصدم ومتانة التصدع لأنواع مختلفة من الفولاذ وفي درجات حرارة موجبة وسالبة .

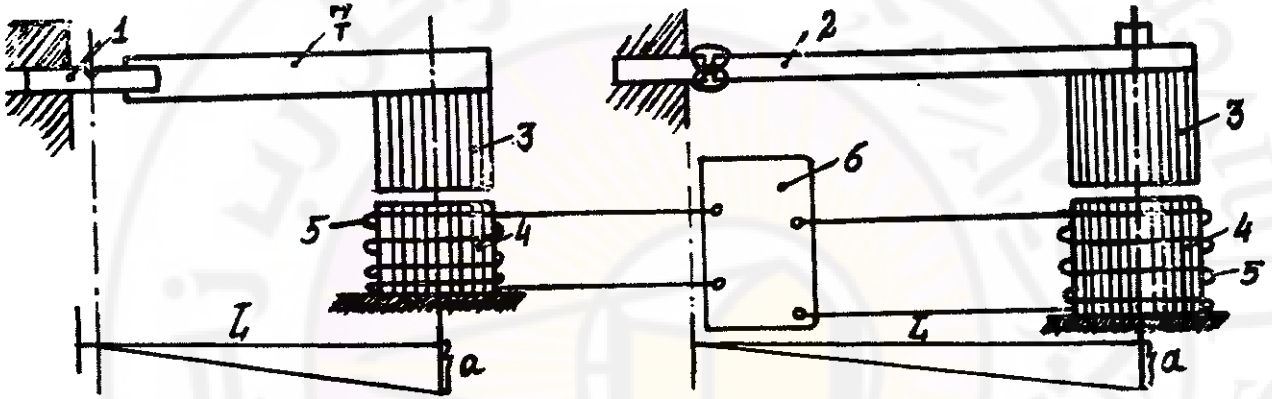
ويبيّن الشكل (٨ ـ ٤٧) المخططات المبسطة جداً لطريقة الاختبار هذه ولكلٍ من عينات تشاربي وإيزود وللوصلات اللحامية .

تتمتع هذه الطريقة بمجموعة من المزايا أهمها :

١ً ـ تعمل آلة الاختبار وفق نظام الاهتزاز الآلي وتحافظ على اهتزاز

---

* ـ من اطروحة الدكتوراة للدكتور المهندس محمد علي سلامة ـ لينينغراد عام ١٩٨٢ .



الشكل (٨ – ٤٧) : مخططات تثبيّن طريقة اختبار عينات تشاربي (أو إيزود) وعينات عبارة عن وصلات لحامية على التعب وفق نظام الاهتزاز التوافقي .

1 – عينة تشاربي (أو إيـزود) . 2 – وصلة لحامية. 3 – القلب العلوي للمغناطيس . 4 – القلب السفلي للمغنـاطيس . 5 – وشـيعة التحـريض – الكهرومغناطيسية . 6 – آلة الاختبار وتتضمن الدارة الكهربائية (للتحكم بمقدارفرقالكمونفي وشيعةالتحريض) والدارات الالكترونية (للتحكم في اهتزاز العينة وفقنظام الاهتزاز الطنيني (Resonans) . 7 – ذراع فولاذي لقبض عينة الاختبار . a – سعة الاهتزاز L – الطولالعملي 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 .

٢ـ 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 ١ر٠ هرتزاً) .

٣ـ يتعلق تردد الطنين لأي مجموعة مهتزة بأبعاد عينة الاختبار التي تحتوي عليها هذه المجموعة ومدى الجساءة في تثبيتها . ويتغير هذا التردد عند ظهور التشقق وأثناء نموه ذلك لأن أبعاد المقطع العرضي للعينة تتغير ، ولهذا صممت آلة الاختبار هذه لتعمل في مجال تردد واسع (من الصفر وحتى ٣٠٠ هرتز) وتبقى محافظة على نظام الاهتزاز الطنيني للمجموعة المهتزة بكاملها مهما كانت قيمة التردد .

أما مبدأ عمل آلة الاختبار فيمكن تلخيصه بما يلي:

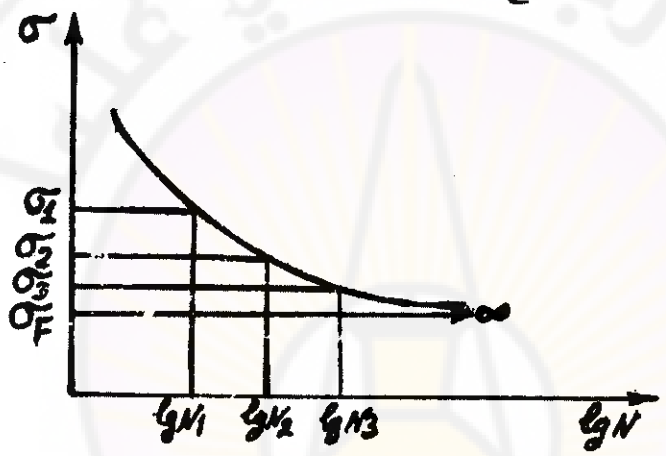
يسبب المغناطيس الكهربائي اهتزاز المجموعة التي تحتوي على عينة الاختبار، حيث يتم تحريض المغناطيس الكهربائي من دارة كهربائية خاصة موجودة في الآلة وبمساعدة خلية ضوئية ذات حساسية عالية مهمتها اقتفاء وضع المجموعة المهتزة وإعطاء نبضة في اللحظة الزمنية المناسبة وذلك بغية المحافظة على طاقة اهتزاز الطنين . أما التحكم بكلٍ من سعة اهتزاز المجموعة وزمن نبضة التيار الكهربائي المار عبر المغناطيس الكهربائي فيتم من خلال التحكم بكلٍ من سعة مجموعة من المكثفات وفرق كمون شحنتها . ويمكن مراقبة تردد الاهتزاز الطنيني

للمجموعة باستخدام جهـاز قياس التردد ، أما عـدد دورات التحميل فتقـاس بوساطـة عداد رقمي الكتروني •

٨ ــ ٩ ــ ٣ ــ طريقة إنشاء منحني فولر :

يُستخدم لانشاء منحني فولر التجريبي عـدد يتراوح بين ٦ و ١٠عينات من العينات التي تختلف أشكالها وأبعادها باختلاف طريقة الاختبار المستخدمـة، وتُحمَّل كل منها بأحمال ترددية بحيث يكون الاجهـاد الترددي على العينة الاولى مساوياً : $\sigma_1 = 0{,}7\,\sigma_y$ (حيث : σ_y حـد الانسياب للمعـدن المراد اختباره على التعب)• ويتم تسجيل عـدد مرات التحميل N_1 حتى لحظةظهور التشقق التعبي في العينة أو حتى لحظـة انكسارها وذلك طبقـاً لطريقة الاختبار المتبعة، ثم تحمل العينة الثانية بإجهـاد أقـل من السابق ويسجل عـدد مرات التحميـل N_2 . ويستمر إنقاص الاجهـاد مع العينات التالية حتى آخر عينة من المجموعة، وتختار خطوات انقاص الاجهاد على العينات المتتالية بحيث تبقى العينة الأخـيرة على الأقل سليمة ــ أي بحيث تصمد إزاء الاجهادات المعرضة لها • ثم يرسم مخطط بياني يؤخذ على محوره الشاقولي الاجهاد، وعلى محوره الافقي عدد مرات التحميل والتي تؤخذ عادةً بخطوات لوغاريتمية نظراً لكبر الارقام التي قد نحصل عليها، وتسجل على المخطط النقاط التي يتم عندها ظهور التشقق التعبي (أو انكسار) كلٍ من العينات المختبرة كما في الشكل (٨ ــ ٤٨) ؛ وبالوصل بين تلك النقاط نحصل على منحني فولر • ويلاحظ أن هذا المنحني يكون شديد الانحدار في بدايته ثم يقل انحداره حتى يتناهى الى خط أفقي • والخط الأفقي هذا هـو حـد الصمود للمادة ، ويقترب المنحني من الخط الأفقي تقريبا عند $N = 2.10^6$ لأكثر المعادن والخلائط الفولاذيـة ، لذلك يعـد أكبر اجهاد يمكن أن تتحمله القطعـة مليوني مرة دون أن يظهـر بها تشقق تعبي (أو تنكسر) هو حـد الصمود لمادة هذه القطعـة •

ومنحني فولر هذا كبير الفائـدة حيث يساعـد من جهـة علىمعرفة حدالصمود للمادة المعنية ومن جهـة أخرى في معرفة عمر القطعـة المعرضة لاجهادات ترددية معروفة القيمة ، أو بالأحرى في تصميم قطعـة ما لتعيش عمراً معيناً أي لتتحمل عدداً معيناً من دورات التحميل ، عندئذ تؤخذ قيمة $\lg N$ على المحور الأفقي ويرفـع منها شاقول حتى يتقاطع مع المنحني ، ومن تلك النقطة نرسم خطاً أفقياً فنحصل على قيمة الإجهاد المسموح به .



الشكل (٨ ـ ٤٨) منحني فولر

وجرت العادة علىأن يبسط شكل منحني فولر، حيث يرسم الجزء الأول منهعلى شكل مستقيم مائل يحدد ميله بمعرفة نقطتين منه والجزء الثاني على شكل مستقيم أفقي بحيث تكون نقطـة تقاطعهما عند $N = 2 \cdot 10^6$ ولتكن معادلة الخط المائـل في هذه الحالة كما يلي :

$$\sigma_a + K \lg N = \sigma_F + K \lg N_0 \qquad (8.87)$$

حيث : σ_F ـ حد الصمود .

N_0 – عدد مرات التحميل المطابقة لنقطة تقاطع المستقيمين المائل والأفقي (أي أن : $N_0 = 2 \cdot 10^6$) .

σ_a – الإجهاد الترددي لنقطة ما على المخطط .

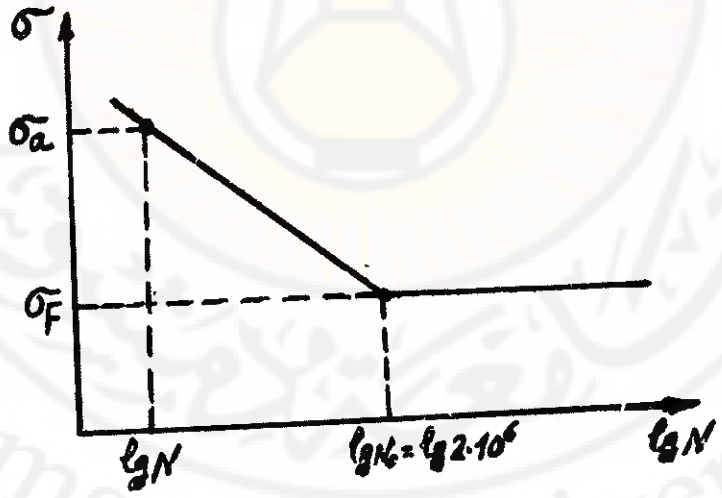
N – عدد مرات التحميل الموافقة للاجهاد σ_a .

K – معامل يحدد ميل المستقيم على الأفق .

غالباً مايكون مطلوباً هو تحديد ميل هذا المستقيم وذلك بغية رسمه وعندها يمكننا من العلاقة (8.87) أن نجد أن ميل المستقيم يحدد بالعلاقة التالية :

$$K = \frac{\sigma_a - \sigma_F}{lg\, N_0 - lg\, N} \qquad (8.88)$$

ولا بد أن ننوه هنا إلى أن الخط المائل على الشكل (٨ – ٤٩) يمثل منحني العمر ، بينما يمثل الخط الأفقي حـد التعب أو حد الصمود للمادة المختبرة .



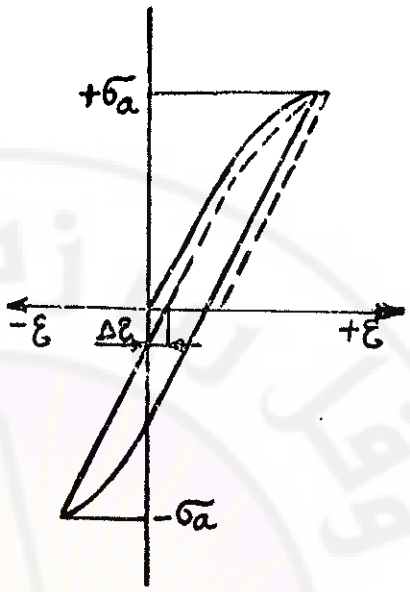
الشكل (٨ – ٤٩) : منحني فولر المبسط

٨ ـ ٩ ـ ٤ ـ ميكانيزم التعب :

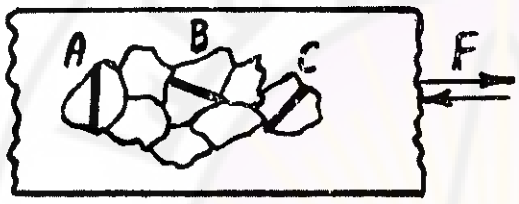
نحن نعلم من خلال دراستنا لعلم مقاومة المواد أن حـد المرونة هو أكبر إجهاد يبقى الانفعال عنده انفعالا مرنا ، ويعـد هذا الحد (تجاوزاً ومن أجل السهولة) مساوياً حد الانسياب ، غير أن حـد المرونة الفعلي للمادة وبخاصـة المقيس على عينة وحيدة البلورة يكون أخفض بكثيرمن حد الانسياب ، والتعب لايمكـن أن يحدث طالما بقيت الاجهادات الترددية واقعـة ضمن المجال المرن للمادة ، أي أن حد التعب حتماً يجب أن يكون أكبر من حـد المرونة للمادة ، إذ أنه حتى يتم ظهور التشقق التعبي في مادة ما أو عينة مايجب أن أن تستهلك كمية من القدرة تصرفها على تغيير شكلها سواء أكان هذا التغير في الشكل قابلاً للقياس (في اختبارالشد) أم غير محسوس (في اختبار التعب) . فعند تحميل العينة باجهـاد شد ـ ضغط متكرر بين القيمتين σ_a و $-\sigma_a$ ـ بحيث تكون σ_a أكبر من حد المرونة ولكن أصغر من حد الانسياب لمادة العينة ، فان كل دورة تحميل سوف تترك في بعض بلورات العينة انفعالاً لدناً مقداره Δ (انظر الشكل ٨ ـ ٥٠) .

وبتكرار دورات التحميل تتراكم هذه الانفعالات حتى تؤدي في النهاية الى تصدع هذه البلورات .

ولكي يزدادهذا الامر وضوحاً ، نفترض أن العينة مصنوعة من مادة بلوراتها ذات مستوي انزلاق وحيد ، ولنختر من بين بلورات هذه العينة البلورات A و B و C (انظر الشكل ٨ ـ ٥١) ، حيث مستوي الانزلاق في البلورة A عمودي على اتجاه القوة ومستوي انزلاق البلورة B يميل بزاوية كيفية على هذا الاتجـاه بينما يشكل مستوي انزلاق البلورة C زاوية مقدارها ٤٥° مع اتجاه القـوة المطبقة . فعند تطبيق القوة سوف تتولد في البلورات إجهادات قص أو انزلاق



الشكل (٨ ــ ٥٠) : تراكم الانفعالات اللدنة في العينة المختبرة على التعب بعد كل دورة تحميل .



الشكل (٨ ــ ٥١) : التباين في مدى تأثر البلورات باجهادات القص طبقاً لتباين اتجاهات مستويات انزلاق هذه البلورات .

تكون أعظمية في مستوي انزلاق البلورة C ومعدومة تقريباً في مستوي انزلاق A ، الأمر الذي يؤدي إلى انزلاق أجزاء البلورة C على بعضها بعضا ، وبتكرار التحميل يتكرّر الانزلاق وتزداد قساوة هذه البلورة بفعل الانزلاق اللدن ولكن لا تزال في الوضع المناسب لتكرار الانزلاق الذي يستمر حتى تستنفذ للبلورة C قابليتها للتشكيل اللدن فتتصدع ، وبتصدعها يزداد معدل الاجهادات في البلورات الباقية ــ 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 لاتستطيع البلورات المشابهة في وضعها للبلورة A من تحملها فتتصدع القطعة بكامل مقطعها . إن انزلاق البلورة C

وتصدعها يتعلق الى حـد كبير بنوعية البلورات المحيطة بها ومدى مقاومة هـذه البلورات للانزلاق الحاصل ، أي أن البلورة c لا تستطيع الانزلاق والتصدع بحرية تامة إلاّ إذا كانت واقعة على سطح العينة ، لذلك فان أي تصدع سـواءً أكان تعبياً وغير ذلك يبدأ دائماً من سطح العينة ويمتد باتجاه الداخل •

من خلال النموذج المبسط السابق نستطيع افتراض التصدع التعبي يتم على مرحلتين رئيستين :

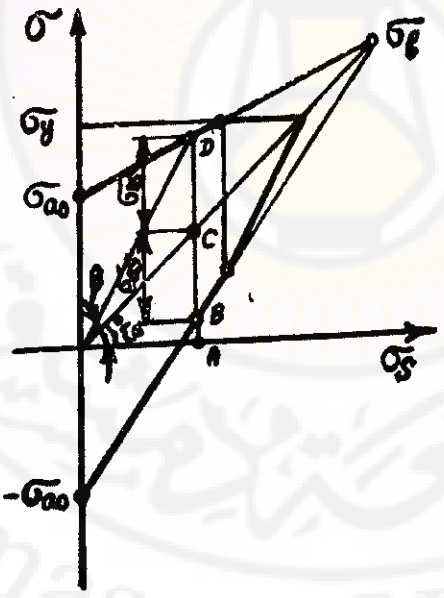
١ً ـ مرحلة وجـود تشققات ميكروية صغيرة جـداً في بلورات المعـدن الأكثر إجهاداً واتجاه هذه التشققات الميكروية في تشقق ماكروي له طول معـين (لا يتجاوز طوله ١ مم) يبدأ من سطح العينة (أو من نقـاط تركيز الاجهادات) وبهذا الشكل تنتهي المرحلة الاولى وهي مرحلة ظهور التشقق التعبي •

٢ً ـ مرحلة نمو هذا التشقق واستمراره بالنمو إلى حـدٍ يصبح معه مقطع العينة الباقي غير قادر على تحمل الاجهادات الترددية مما يؤدي الى تصدع المعدن بكاملـه •

٨ ـ ٩ ـ ٥ ـ مخطط الاجهادات الحدية (مخطط سميث):

إن حـد الصمود (أو حـد التعب) لكل مادة من مواد الانشاءات المعدنية يمكن أن يأخذ قيماً كثيرة ومختلفة وذلك حسب طبيعة الاجهادات أو بالأحرى حسب مقدار الاجهاد الستاتيكي المركب على الاجهاد الديناميكي • ولا يُعبر عن حد الصمود بقيمة واحـدة إلا عندما يكون الاجهاد اجهادا ديناميكيا مطلقا أي عندما تكون قيم σ_s مساوية الصفر ، ويصبح الاجهاد الديناميكي من النوع المسمى الاجهاد المتماثل (أي أن : $R = -1$ كما بيّنا آنفاً) • لهذا كان لا بد من إنشاء مخطط يُبيّن القيم المختلفة لحد الصمود باختلاف قيم الاجهادات الستاتيكية المركبة على

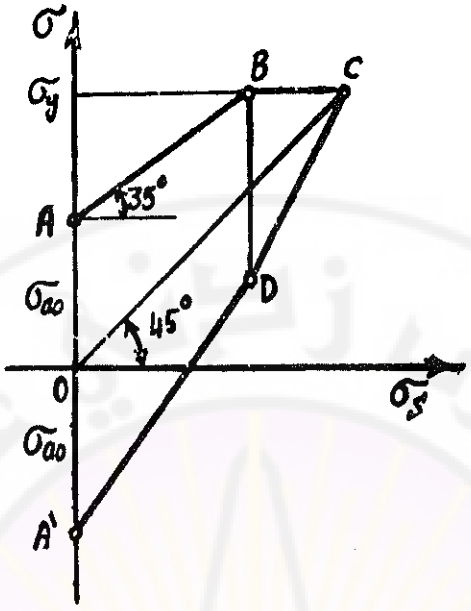
الاجهادات الديناميكية للاستفادة منها عند التصميم • وقد ابتكرت عدة طـرق لإنشاء مخططات من هذا النوع كانت أهمها وأكثرها استعمالاً طريقة سميث Smith المبيَّنة على الشكل (٨ ــ ٥٢) ، حيث تؤخذ على محور الاحداثيات الافقي σ_s وعلى الشاقولي σ_{max} و σ_{min} ثم يرسم من مركز الاحداثيات مستقيم بزاويـة ميل ٤٥° على كلٍ من المحورين • وبعد اجراء عـدد 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 تقاطعـه معه (C) يؤخذ إلى الاعلى وإلى الاسفل طول يعادل قيمة σ_a التابعة لـ σ_s المعنية ، فنحصل على النقطتين B و D اللتـين تمثلان الاجهادات الحدية لدورة التحميل σ_{min} و σ_{max} بالترتيب •



الشكل (٨ ــ ٥٢) : مخطط الإجهادات الحدية (مخطط سميث) .

وبوصل النقاط التي تشير الى قيم σ_{max} للاختبارات أو بالاحرى العينات المختلفة مع بعضها من جهـة والنقاط الدالة على قيم σ_{min} مع بعضها من جهة أخرى نحصل على المخطط المغلق المسمى مخطط سميث ، ومن البدهي أن يلتقي الخطـان الواصلان بين قيم الاجهادات العظمى والصغرى عند قيمة σ_b أي عند حد الاجهاد الاعظمي للمعدن وعندها تكون ($R = 1$) . ولقد جرت العادة أن يقطع المخطط بخط أفقي عند قيمة σ_y (أي عند حـد الانسياب) ذلك لان تجاوز قيمة σ_{max} لهذا الحد ليس له أي قيمة من الناحية العملية وكذلك تقطع قيـم σ_{min} بما يتناسب مع الخط الافقي السابق .

ولتسهيل عملية إنشاء مخطط سميث فقـد اقترح اتحاد المهندسين الألمـان VDI استعمال الطريقة التقريبية التالية : تجرى اختبارات لتحديد حد الصمود σ_{min} بجعـل الاجهادات اجهادات ديناميكية فقط أي إجهادات متماثلة ، وتؤخذ قيمة σ_a على المحور الشاقولي بكلٍ من الاتجاهين (انظر الشكل ٨ ــ 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 مركـز الاحداثيات المستقيم المائل بزاوية ٤٥° ثم نرسم من النقطـة المثلة لقيمة σ_y على المحور الشاقولي مستقيما افقيا فيقطع المستقيمين السابقين في النقطتين B و C وبايجادنا للنقطة D نظيرة النقطـة B شاقولياً بالنسبـة للمستقيـم المنصف والوصل بين النقاط A B C D A' نحصل على شكل تقريبي لمخطط سميث يمكـن أن يفي بالغرض ولو أنه أقـل دقـة من المخطط المرسوم بالطريقة السابقة . ونود أن ننوه هنا إلى أن أي مستقيم يمر عبر نقطة تقاطع محاور الاحـداثيات لمخطط



الشكل (٨ ــ ٥٣) : مخطط سميث التقريبي وفق اقتراح اتحاد المهندسين الالماني .

سميث (انظر الشكل ٨ ــ ٥٢) يعد المحل الهندسي للنقاط التي تميز دورات التحميل المتشابهة أي التي تتساوى فيها عوامل اللاتناسق ($r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$) . حيث نستنتج من الشكل :

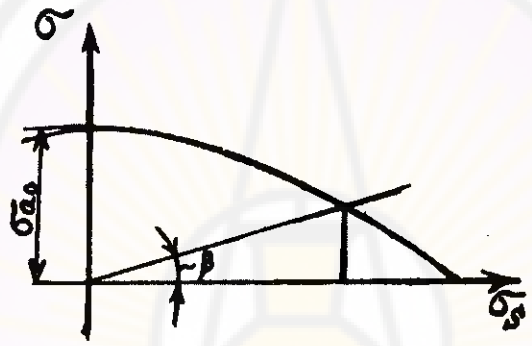
$$tg\,\beta = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_s} = \frac{2\,\sigma_{max}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{2}{1+r} \qquad (8.89)$$

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 ــ 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 :

$$tg\,\beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_s} = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})/2}{(\sigma_{max} + \sigma_{min})/2} = \frac{1-r}{1+r} \qquad (8.90)$$



الشكل (٨ ــ ٥٤) : احد مخططات الاجهادات الحدية المبسط .

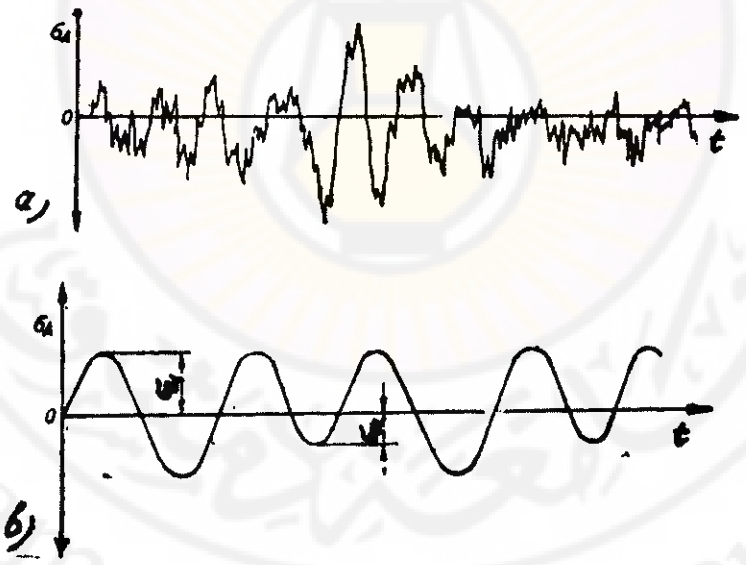
٨ ــ ٩ ــ ٦ ــ الطرق المختصرة لانشاء منحني فولر :

سبق أن ذكرنا أن اختبار التعب غالباً ماتكون غايته هي إيجاد منحني فولر للمادة موضوع الاختبار . وايجاد هذا المنحني 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 منحني فولر التقريبي أو المبسط من إجراء الاختبار على عينة

واحدة فقط،وكل هذه الطرق تستند إلى نظرية بالمغرين وماينر (Palmagren - Miner) والمسماة نظرية تراكم الأضرار .

٨ ـ ٩ ـ ٦ ـ ١ ـ نظرية بالمغرين وماينر :

كثيراً مايصادف في الحياة العملية أن الاجهادات المتغيرة مع الزمن لايكون تغيرها جيبياً بسيطا وانما غالباً ماتكون 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 ماهو مبيَّن في الشكل (٨ ـ ٥٥ a) منه الى التغير الجيبي البسيط.



الشكل (٨ ـ 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_2} و σ_{a_1} (انظر الشكل ٨ ــ ٥٥ b) عندئذ يمكن تحديد عدد الدورات أو عدد مرات التحميل التي تسبب الكسر حسب نظرية تراكم الضررعلى 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 ٨ــ٩ــ٣ 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 (مرحلتي) التحميل المختلفة مساوياً العمل الكلي اللازم للكسر ، أي حسب مثالنا هذا سوف تنكسر القطعة (أو المحور) عندما يصبح :

$$\frac{W \cdot n_1}{N_1} + \frac{W \cdot n_2}{N_2} = W \qquad (8 \cdot 91)$$

أي عندما يصبح :

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \qquad (8.92)$$

وبالطريقة نفسها يمكن البرهان على أنه لو تم التحميل باجهادات ترددية ذات سعات مختلفة وعددها m فان الكسر سوف يحدث عندما يُستهلك العمل الكلي اللازم لاحداث الكسر ــ أي عندما يصبح :

$$\sum_{1}^{m} \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \ldots + \frac{n_m}{N_m} = 1 \qquad (8.93)$$

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 ــ ٩ ــ ٦ ــ ٢ ــ طريقة لوكاتي :

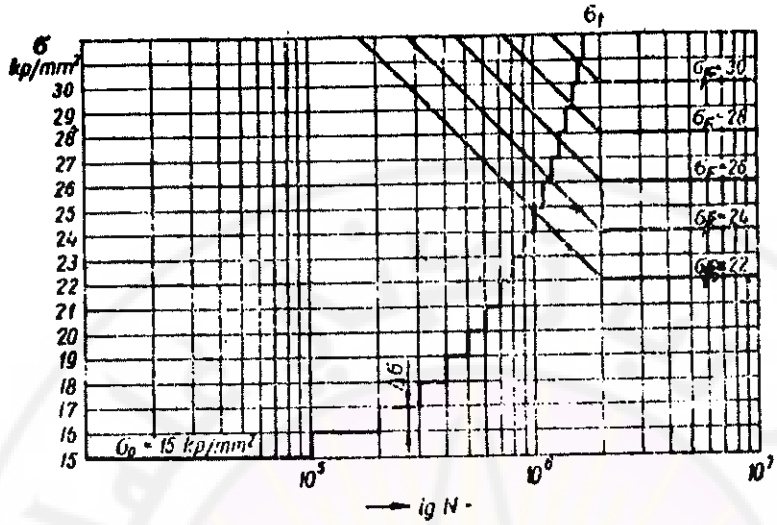
في هذه الطريقة تقدر مسبقاً قيمة حد الصمود المتوقع عليه بشكل تقريبي لمادة العينة المراد اختبارها ، ثم يرسم عدد من منحنيات فولر المسبطة (لايقل عن ثلاثة منحنيات) بحيث يعطي بعضها حدود صمود أعلى وبعضها الآخر حدود صمود أخفض من حد الصمود المتوقع ، ثم يبدأ بتحميل العينة باجهاد ترددي σ_0 سعته منخفضة بالنسبة لحد الصمود المتوقع ويستمر بالتحميل لعدد معين من المرات n ، وبعدئذ يرفع مستوى الاجهاد بمقدار $\Delta\sigma$ إلى σ_1 وتحمل العينة من جديد n مرة ، ويستمر برفع الاجهاد بالمقدار نفسه $\Delta\sigma$ والتحميل بالعدد نفسه من المرات n عند كل إجهاد جديد حتى تنكسر العينة عندئذ تحسب قيمة $\Sigma \frac{n}{N}$ حسب كل من منحنيات فولر التقريبية المرسومة

مسبقاً على حدة ، فيكون الناتج قيماً مختلفة لهذا المجموع ، وسوف يكون بعضها أصغر وبعضها الآخر أكبر من الواحد ، وبرسم هذه القيم في مخطط بياني تؤخذ على محوره الافقي قيم $\Sigma \frac{n}{N}$ وعلى محوره الشاقولي σ_F . فمن هذا المخطط وبطريقة التقريب الداخلي (interpolation) يمكن ايجاد حد الصمود الحقيقي للمادة .

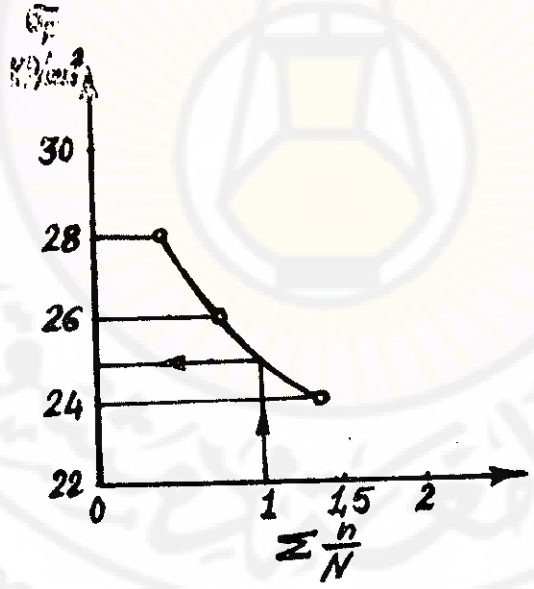
ولزيادة توضيح هذه الطريقة لنفرض انه لدينا عينة من الفولاذ C35 والذي حد صموده تقريبا نحو ٢٥ كيلو بوندا/مم٢ . نرسم ثلاثة منحنيات فولرمبسطة بحيث تتراوح حدود صمودها بين قيمتين احداهما أخفض والاخرى أعلى من حد الصمود التقريبي السابق ، فنرسم المنحني الاول بحيث يعطي حد صمود $\sigma_F = 24$ والثاني $\sigma_F = 26$ ، والثالث $\sigma_F = 28\ KP/mm^2$. نبدأ بتحميل العينة باجهاد أولي سعته ١٥ كيلو بوندا/مم٢ ولعدد من المرات مقداره $n = 10^5$ ، ثم نرفع سعة الاجهاد بمقدار $\Delta\sigma = 1\ KP/mm^2$ إلى σ_1 ونحمل بعدد المرات n نفسها ، ثم نرفع الاجهاد من جديد بالمقدار نفسه $\Delta\sigma$ إلى σ_2 ونحمل أيضا بعدد المرات n نفسها (يفضل أن يكون كل" من $\Delta\sigma$ و n ثابتاً لتسهيل عملية تقويم النتائج) ونستمر بهذه الخطوات حتى تتكسر العينة (انظر الشكل٨ــ٥٦) . بعدئذ نحسب $\Sigma \frac{n}{N}$ لكل من المنحنيات الثلاثة على حدة فنحصل على القيم التالية :

$$\Sigma \frac{n}{N_{28}} = 0,4 \quad ، \quad \Sigma \frac{n}{N_{26}} = 0,74 \quad ، \quad \Sigma \frac{n}{N_{24}} = 1,37$$

وطريقة حساب هذه القيم يثبتها الجدول رقم (٨ ــ ٤) . وبرسم هذه القيم الثلاث في مخطط بياني $\Sigma \frac{n}{N} - \sigma_F$ (انظر الشكل ٨ ــ ٥٧) نستطيع ايجاد



الشكل (٨ – ٥٦) : تعيين حد الصمود للمادة باختبار عينة واحدة (طريقة وكاتي) .



(الشكل ٨ – ٥٧) : ايجاد حد الصمود طبقا لنظرية تراكم الأضرار .

الجـدول (٨ ــ ٤) : تقويم نتائج طريقة لوكاتي

		$\sigma_F = 24$		$\sigma_F = 26$		$\sigma_F = 28$	
kp/mm²	$n \cdot 10^{-5}$	$N \cdot 10^{-5}$	$\frac{n}{N}$	$N \cdot 10^{-5}$	$\frac{n}{N}$	$N \cdot 10^{-5}$	$\frac{n}{N}$
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 بيانياً ، والذي نرى من الشكل أن قيمته $\sigma_F = 24{,}9$ KP/mm²

بافتراض أ ن منحني فولر المتضمن لحد الصمود الحقيقي هو الذي يجب أن يعطي $\Sigma \frac{n}{N} = 1$ حسب نظرية تراكم الاضرار .

٨ ـ ٩ ـ ٧ ... تأثير العوامل التنكولوجية والتصميمية في قيم حدالصمودللمادة:

بيّنا آنفاً أن مزايا الاجهـاد الترددي (أي مقدار الاجهاد الستاتيكي المركب على الاجهاد الديناميكي) تؤثر في قيم حـد الصمود الناتجـة وللسـادة المختبرة نفسها . ولكن هناك مجموعة كبيرة من العوامل التي تؤثر أيضافي قيم حدالصمود هذه ، نذكر منها :

١ً ـ تركيز الاجهادات (أي وجـود ثقوب أو حزوز أو أي تغيرات مفاجئة في المقطع العرضي لعينة الاختبار) .

٢ً ـ الابعاد المطلقة للمقطع العرضي لعينات الاختبار (عامل الأبعاد) .

٣ً ـ نوع الوسط الذي يتم به الاختبار .

٤ً ـ درجة حرارة الاختبار .

٥ً ـ نظام التحميل المستخدم وتردده .

ولبيان مدى تأثير أيٍ من العوامل آنفة الذكر (أو أكثر من عامل) في قيـم حـد الصمود لمادة ما يتم في البداية اختبار مجموعة من العينات ذات سـطوح مصقولة تماما وفي درجة الحرارة العادية شريطة أن يتم الاختبار بدورات تحميل متماثلة ($\sigma_s = 0$) ويعين حد الصمود للمادة ، ويرمز له بالـرمز (σ_{-1}) . ثم تؤخذ مجموعة أخرى من العينات ومن المادة نفسها ولكن بتوافر عامل (أوأكثر) من العوامل السابقة يتم الاختبار وبدورات تحميل متماثلة أيضا ويعين حدالصمود للمادة ، ويرمز له في هذه الحالة [١٢] (σ_{-1k}) .

وتتوفر في الوقت الحاضر مجموعة كبيرة جدا من العلاقات الرياضية التجريبية التي تأخذ بعين الاعتبار تأثير واحـد من هذه العوامل (أو أكثـر) في حـد الصمود للمادة . ولكن لم تتوافر حتى وقتنا هذا تلك العلاقة التي تأخذ بعـين

الاعتبار جميع هذه العوامل • فمثلاً تبيّن العلاقة التجريبية التالية تأثير تركيز الاجهادات في قيم حـد الصمود للمادة :

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma - 1}{\sigma - 1k} \qquad (8.94)$$

حيث : K_{σ} ـ معامل تركيز الاجهادات الفعلي •

ويتعلق معامل تركيز الاجهادات الفعلي هذا بدوره بمعامل تركيز الاجهادات النظري α_{σ} وبمدى حساسية المعدن لتركيز الاجهادات وذلك من العلاقة التالية:

$$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma} (\alpha_{\sigma} - 1) \qquad (8.95)$$

حيث q_{σ} ـ معامل حساسية المعدن لتركيز الاجهادات •

وهناك بعض الابحاث التي تعرض العلاقة التجريبية التالية لايجاد قيم K_{σ} :

$$K_{\sigma} = (\alpha_{\sigma})^{n} \qquad (8.96)$$

حيث : n ـ معامل يتعلق بخواص معدن العينة وشكلها وأبعادها •

وفي أبحاث أخرى تؤخذ بعين الاعتبار الانصالات اللدنة في منطقة تركيز الاجهادات :

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma} \frac{1}{1 + \nu} \qquad (8.97)$$

حيث : ν ـ المعامل الدوري لحساسية المادة لمركّز الاجهادات (أي الحز

أو الثلم أو الثقب ... الخ) ويتعلق هذا المعامل بحد الصمود للمادة وبالطاقة المتصة من قبلها عند اخضاعها لحملٍ ترددي .

ونود أن ننوه إلى أنه لايمكن لأي من العلاقات (8.94) ÷ (8.97) أن تكتسب صفة الشمولية ، ذلك لان الثوابت q_σ و n و ، لاتتعلق بخاصية المادة المختبرة فحسب وإنما تتعلق بكلٍ من الحالة الاجهادية والابعاد المطلقة للعينة وبعوامل 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 شمولية من السابقة وتأخذ بعين الاعتبار (ماعدا المعامل α_σ) الميزات الاخرى لحقل الاجهادات . ففي بعض الأبحاث يؤخذ بعين الاعتبار تدرج الاجهادات (gradient) في نقاط الجسم الاكثر اجهاداً :

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma}{G_\sigma \left[\frac{\sigma}{a} + 1\right]^b} \qquad (8.98)$$

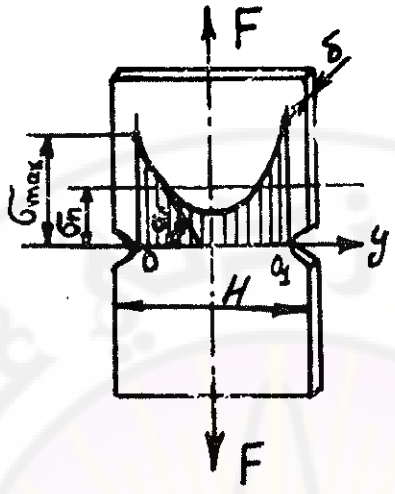
حيث : a و b — ثوابت تتعلق بخواص المادة وتحدد تجريبياً .

G_σ — التدرج النسبي للاجهاد الناظمي المؤثر باتجاه قوة الشد P (انظر الشكل ٨ — ٥٨) . حيث يمكن ايجاد G_σ كمايلي :

$$G_\sigma = \frac{G}{\sigma_{max}} = \frac{1}{\sigma_{max}} [K \operatorname{tg} \theta] = \frac{1}{\sigma_{max}} \left[\frac{d\sigma}{dy}\right]_{y=0} \qquad (8.99)$$

حيث : K — معامل الأبعاد .

وتتوافر في الوقت الحاضر معادلة أبسط من السابقة لإيجاد قيمة K_σ :



الشكل (٨ – ٥٨) : تركيز الاجهادات في صفيحة تحتوي على حزوز جانبية عند اخضاعها لاجهادات شد .

σ_{max} – الاجهادات الانظمية عند قاع الحز في النقطتين O و O_1 .

σ_n – الاجهادات المثلى في حال عدم وجود حزوز . حيث : $\sigma_n = \frac{F}{H \cdot \delta}$

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma}{1 + \sqrt{\rho^* G_\sigma}} \qquad (8.100)$$

حيث : G_σ ثابت يتعلق بنوع المادة المختبرة ويدعى نصف قطر العنصر البلوري ويحدد تجريبياً .

مما سبق نستطيع أن نستنتج أنه لايمكن الإلمام بدراسة تأثير جميع العوامل آنفة الذكر في حد الصمود للمادة مجتمعة أو متفرقة ولايمكن في موضوع واحد الإلمام بالعلاقات الرياضية كافة التي تبيّن تأثير هذا العامل أو ذاك في حدالصمود وكيفية ادخال هذه العلاقات في الحسابات التصميمية لقطع الآلات أو الإنشاءات المختلفة .

٨ ــ ١٠ ــ الاختبارات في ظروف مغايرة للظروف العادية :

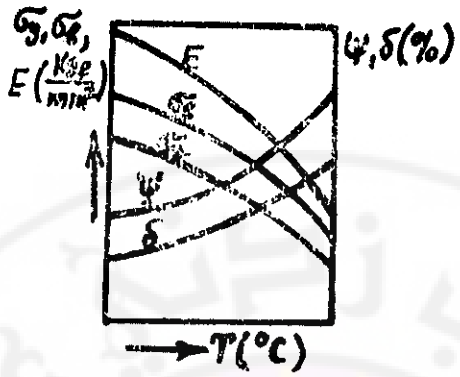
تعرّف الاختبارات في ظروف مغايرة للظروف العادية على أنها مجموعة الاختبارات التي تجرى لاختبار المعادن في درجات الحرارة السالبة أو في درجات الحرارة الأعلى من درجة الحرارة العادية .

الاختبارات التي تجرى لاختبار المعادن في درجات الحرارة السالبة أو في درجات والصدم . ويتم اختبار الشد بالطريقة نفسها التي يتم فيها عند درجة الحرارة العادية ولكن بعد تزويد آلة الاختبار بحوض تبريد خاص يحتضن العينة ويبردها 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 يتمان بالطرق نفسها التي رأيناها سابقا بعد تزويد آلات الاختبار بأفران انبوبية خاصة تحتضن العينات لتسخينها والمحافظة على درجة حرارتها أثناء اجراء الاختبار . وسوف نتعرف فيما يلي على اختبار الزحف والذي يمكن عده شكلا من أشكال اختبارات الشد في درجات الحرارة المرتفعة ولكن بالتحميل 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 ــ ١٠ ــ ١ ــ تأثير ارتفاع درجات الحرارة في الخواص الميكانيكية للمعادن :

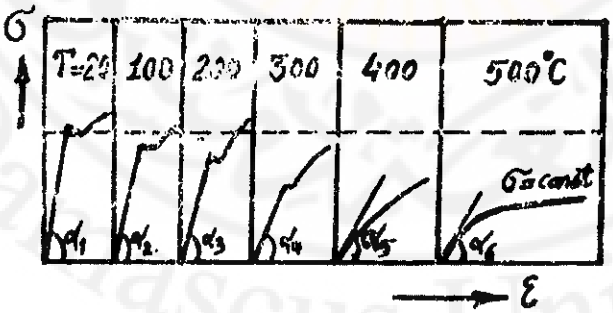
تتغير الخواص الميكانيكية للمعدن عند ارتفاع درجة حرارته ، إذ يؤدي ارتفاع درجة الحرارة بصفة عامة إلى انخفاض قيم حدي المتانة والانسياب للمعدن وازدياد قابليته للتشكيل (أي ازدياد قيم الاستطالة δ والتقلص ψ) . ويبيّن الشكل (٨ ــ ٥٩) تأثير درجة الحرارة في قيم هذه الوحدات .



الشكل (٨ ــ ٥٩) : تغير خواص المعدن الميكانيكية بتغير درجة حرارته .

ولقد لوحظ أن مخطط الشد للفولاذ الكربوني يتغير شكله بتغير درجةالحرارة التي يتم عندها الاختبار على الشد (انظر الشكل ٨ ــ ٦٠) . فمن هذا الشكل نلاحظ أن ارتفاع درجة حرارة الاختبار يؤدي الى انخفاض قيم حد الانسياب (ممثلاً بالعتبة الأفقية) ، حتى اذا أصبحت درجة حرارة الاختبار أعلى من 400 °C تزول معالم هذه العتبة الافقية ويحدث الزحف في المعدن ــ أي يستمر الانفعال بالازدياد على الرغم من ثبات قيمة الاجهاد المؤثر في عينة الاختبار .

ونلاحظ من الشكل (٨ ــ ٦٠) أيضا 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 .

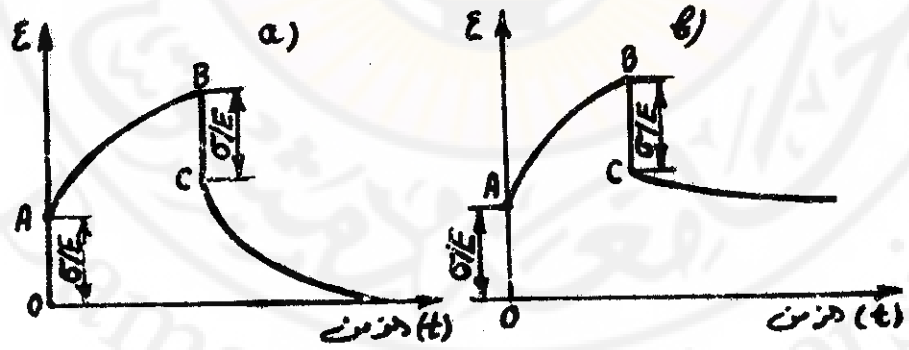


الشكل (٨ ــ ٦٠) : تغير شكل مخطط الشد للفولاذ الكربونيبتغير درجة حرارة الاختبار .

٨ ــ ١٠ ــ ٢ ــ المفهــوم الاساسي للزحف في المعادن :

إذا حدث وتغيرت قيم الاجهادات والانفعالات في معدن ما بمرور الزمن على الرغم من أن قيم الحمل المطبق على المعدن لم تتغير فان 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 .

ويمكن للزحف الذاتي أن يكون مرناً ولدناً. فاذا كان الزحف الذاتي مرناً فان الانفعالات التي تظهر بمرور الزمن تختفي نهائيـاً وبمرور الزمن أيضاً وذلك عند زوال الحمل المطبق . أما إذا كان الزحف الذاتي لدناً فان الانفعالات المرنـة تختفي بزوال الحمل المطبق ، أما الانفعالات اللدنة فان قيمها تنخفض ببطء ولكنها لاتزول نهائياً (انظر الشكل ٨ ــ ٦١ b) . ونود أن ننوه هنا إلى أن الزحف في المعادن يحدث سواءً أكانت الانفعالات التي تظهر في بداية تطبيق الحمل انفعالات مرنة أم لدنة (متبقية) .



الشكل (٨ ــ 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 :

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \text{const} \qquad (8.101)$$

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 :

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} \qquad (8.102)$$

وبما أن الانفعال الكلي ε لايتغير بمرور الزمن ويساوي الانفعال الاولي $\varepsilon(0)$. وماعدا ذلك وفي اللحظات الاولى من تطبيق الحمل يتحقق قانون هوك، أي أن :

$$\varepsilon = \varepsilon(0) = \frac{\sigma(0)}{E} \qquad (8.103)$$

حيث : $\sigma(0)$ – الاجهاد المؤثر في اللحظات الأولى من تطبيق الحمل . ومنه نجد أن :

$$\frac{\sigma(0)}{E} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p \qquad (8.104)$$

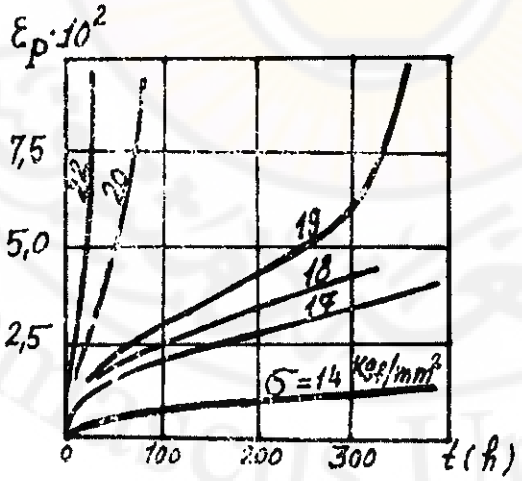
ومن العلاقة (8.104) نلاحظ أن ازدياد الانفعالات اللدنة يؤدي باستمرار إلى انخفاض الاجهاد وحـدوث الارتخاء .

٨ ــ ١٠ ــ ٣ ــ مخطط الزحف للمعادن :

نحن نعلم أنه عند تحميل عينة ما فان الانفعال يزداد من الصفر وحتى قيمة معينة . والانفعال الذي يظهر عند التحميل يمكن أن يكون مرنا أو أن يكون مرناً ــ لدناً وذلك تبعاً لقيمة الحمل المطبق في بداية الاختبار . ولقد بيّنا آنفاً أن الانفعال في العينة يزداد بمرور الزمن .

وجرت العادة على أن تعالج نتائج اختبار الزحف على شكل منحنيات (انظر الشكل ٨ ــ 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 .

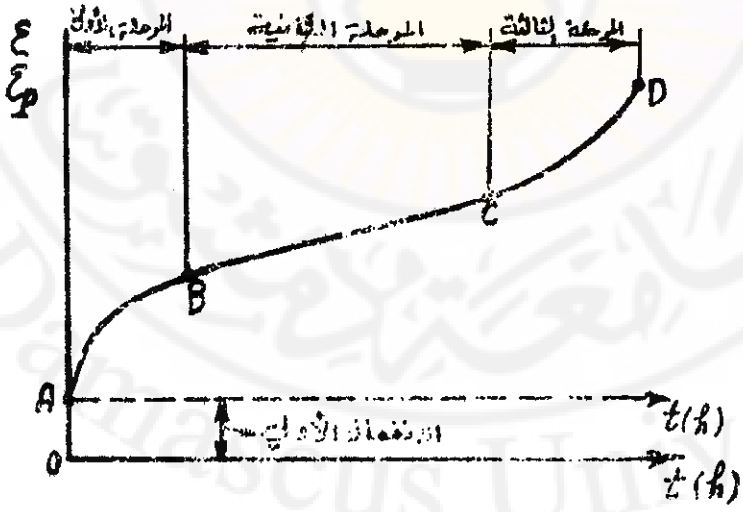
يتعلق شكل منحنيات الزحف بقيم الاجهادات المطبقة ودرجة حرارة الاختبار . فعند تطبيق حمل ما على عينة كانت قد سُخّنت



الشكل (٨ ــ ٦٢) : منحنيات الزحف للفولاذ عند درجة الحرارة (600 °C) .

إلى درجة حرارة معينة فان الانفعال يزداد بسرعة من الصفر وحتى قيمة معينة (الخط الشاقولي OA على الشكل ٨ ــ ٦٣) • فاذا كان الاجهاد المطبق يقع ضمن مجال المرونة لمعدن العينة فان هذا الانفعال مرن واذا كانت قيم الاجهاد المطبق تفوق حد المرونة فان الانفعال مرن ــ لدن في الوقت نفسه وعند توقف زيادة الحمل المطبق فان الانفعال الكلي في العينة سوف يزداد بالتدريج بمرور الزمن وسوف يكون ازدياده وفق المنحني ABCD (انظر الشكل ٨ ــ 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 أحيانا رسم منحني الزحف الذي يُبيِّن فقط علاقة الانفعال اللدن ε_p (المتشكل نتيجة الزحف) بالزمن ؛ وعندها فان محور السينات في مخطط الزحف هو الخط المتقطع على الشكل (٨ ــ ٦٣) •



الشكل (٨ ــ ٦٣) منحني الزحف (أو مخطط الزحف) .

يعبر ظل زاوية ميل المماس للمنحني ABCD على محور السينات عن سرعة الانفعال ، والتي تساوي في الوقت نفسه سرعة الانفعال اللدن $\dot{\varepsilon}_p$:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_p = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_0}{dt} \qquad (8.105)$$

نلاحظ من الشكل (٨ ــ 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 وتصبح معها العلاقة بين الانفعال والزمن علاقة خطية ــ أي أن سرعة الزحف تكون عند أدنى قيمة لها وثابتة ، وعند درجة حرارة معينة تشكل هذه السرعة تابعا للاجهاد:

$$\dot{\varepsilon}_{p\,min} = Q(\sigma) \qquad (8.106)$$

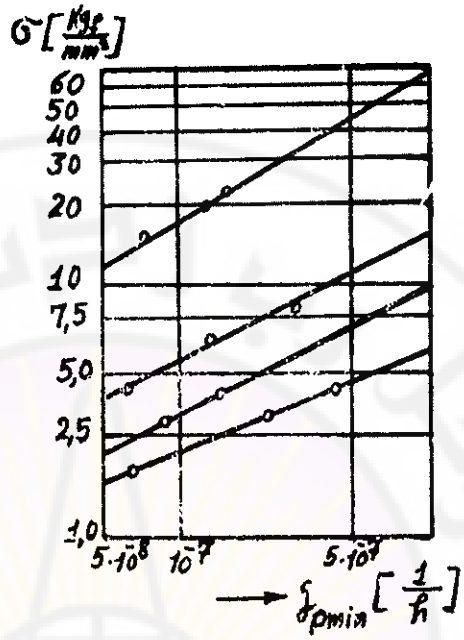
ولقد ثبت تجريبيا أن علاقة السرعة الدنيا للزحف (للانفعال اللدن) بالاجهاد هي علاقة أسية :

$$\dot{\varepsilon}_{p\,min} = k\,\sigma^{n} \qquad (8.107)$$

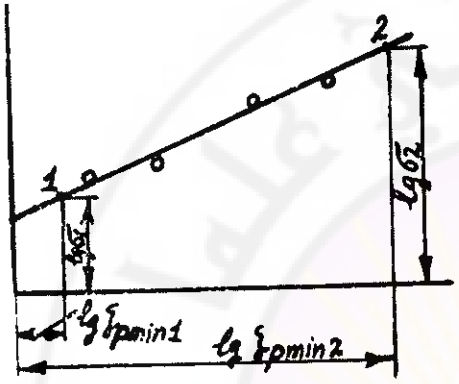
أو :

$$\lg \dot{\varepsilon}_{p\,min} = \lg k + n \lg \sigma \qquad (8.108)$$

وتعني المعادلة أن العلاقة بين لوغاريتم سرعة الزحف الدنيا ولوغاريتم الاجهاد هي علاقة خطية ، وهذا مايؤكده الشكل (٨ ــ ٦٤) ، إذ يُبيِّن هذا الشكل مجموعة من منحنيات الزحف للفولاذ الكرومي . ويمكننا من هذه المنحنيات أن نحصل على قيم المعامل k والأس n ، حيث نقوم في بداية الامر بحساب



الشكل (٨ ــ ٦٤) : العلاقة التجريبية بين قيم الاجهاد المطبق وسرعة الزحف الدنيا في الفولاذ الكروي .



الشكل (٨ ــ ٦٥) : طريقة تعيين المعامل k والاس n

سرعة الزحف الدنيا من أجل إجهادات مختلفة ، ثم ننقل النتائج إلى المخطط الذي احداثياته $\lg \xi_{p\,min}$ و $\lg \sigma$ (انظر الشكل ٨ــ٦٥) ، ثم نرسم المستقيم التقريبي الذي يجمع بين نتائج التجارب ونختار على هذا المستقيم نقطتين 1 و 2 احداثياتهما : $\lg \xi_{p\,min1}$ و $\lg \sigma_1$ ، $\lg \xi_{p\,min2}$ و $\lg \sigma_2$ بالترتيب .

وبالرجوع إلى المعادلة (8.108) نجد أن :

$$\left.\begin{aligned} \lg \xi_{p\,min1} &= \lg k + n \lg \sigma_1 \\ \lg \xi_{p\,min2} &= \lg k + n \lg \sigma_2 \end{aligned}\right\} \qquad (8.109)$$

ومنه نجـد أن :

$$n = \frac{\lg \frac{\xi_{p\,min2}}{\xi_{p\,min1}}}{\lg \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \qquad (8\cdot110)$$

$$\left.\begin{aligned} \lg k &= \lg \xi_{p\,min1} - n \lg \sigma_1 \\ \lg k &= \lg \xi_{p\,min2} - n \lg \sigma_2 \end{aligned}\right\} \qquad (8\cdot111)$$

وتعطى 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 الـزحف بشـكل مستمر ويحدث تصدع العينة في النقطة D . وتظهر هذه المرحلة عند بدء تشكـل الشقوق أو الشروخ الصغيرة بين البلورات والتي لاتلبث أن تبدأ بالازدياد في العدد والاتساع في الحجـم ، الامر الذي يؤدي إلـى تناقص في المقطـع وازدياد في الاجهاد وبالتالي تسارع الانفعـال حتى يتم التصدع ، لهذا فان التصدع الناجـم عن الزحف يتم عادةً عبر حـدود الحبيبات على غرار مايحدث في التصدع الهش. ونود أن ننوه إلى أن ازدياد قيم كلٍ من الاجهاد المطبق ودرجة حرارة الاختبار على الزحف يؤد يالى ازدياد سرعـة الزحف وبالتالي إلى قصر الفترة الزمنيـة للمرحلة الثانيـة .

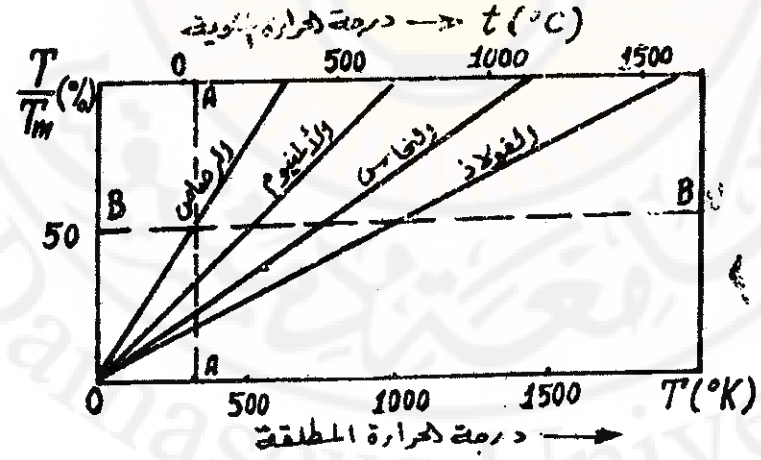
٨ ــ ١٠ ــ ٤ ــ مخطط درجات حرارة التناظر :

لا يحدث الزحف في المعدن عادةً إلاّ إذا تجاوزنـا بتسخينه درجة حرارة

معينة ، وتتعلق درجة الحرارة هذه بنوع المعـدن وبخاصة بدرجة حرارة انصهاره. فمثلاً لا يحدث الزحف في الحديد إلا إذا كان مسخناً إلى درجة حرارة أعلى مـن 300 °C ، بينما يمكن أن يحـدث الزحف في الرصاص عند درجة الحرارة 27 °C . وبغية دراسة تأثير درجة الحرارة في سلوك الزحف عند المعادن ومعرفة القوانين المشتركة لهذا السلوك في المعادن المختلفة تم ايجاد مايسمى 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 درجـة حـرارة التناظر هذه هي نسبة مئوية . وتستعمل درجة حرارة التناظر للمقارنة بين سلوك الزحف عند المعادن على الرغم من اختلاف كلٍ من درجة حرارة انصهار كل منها ودرجة الحرارة التي يتم عندها الاختبار على الزحف (انظر المخطط على الشكل ٨ ــ ٦٦) ، حيث تتضمن احداثيات هذا المخطط :

١ً ــ درجة حرارة التناظر مقدرة بالنسبة المئوية على المحور الشاقولي .

٢ً ــ درجة الحرارة المطلقة مقدرة بالـ (K) على المحور الافقي السفلي .



الشكل (٨ ــ ٦٦) : مخطط درجات حرارة التناظر .

٣ً ــ درجة الحرارة المئوية مقدرة بال (°C) على المحور الافقي العلوي .

ولقد تم رسم خطوط مستقيمة تصل مابين درجة الصفر المطلق ودرجةانصهار كلٍ من المعادن المبيَّنة على المخطط . فاذا أخذنا درجة حرارة التناظر مساوية 50% وأنشأنا منها خطاً أفقيا (BB) فانه يتقاطع مع المستقيمات المرسومة في النقاط التي احداثياتها على المحور الافقي العلويهي : 27 °C للرصاص، 195 °C للالمنيوم : 405 °C للنحاس، 625 °C للفولاذ ، وتكـون النسبة 50% محققة وذلك لأن :

$$\frac{T}{T_m} = \frac{27 + 273}{327 + 273} = \frac{195 + 273}{660 + 273} =$$

$$= \frac{405 + 273}{1083 + 273} = \frac{625 + 273}{1520 + 273} = 50\% \qquad (8.112)$$

وهذا يعنيأن سلوك الزحف عند معدن الرصاص في درجة الحرارة 27 °C مشابه لسلوك الزحف عند معدن الالمنيوم في الدرجة 195 °C ومشابـه لسلوك الزحف عند معدن النحاس في الدرجة 405 °C وهكذا .

من هنا نستنتج أنه إذا أردنا معرفـة سلوك الزحف في الفولاذ عند الدرجة 625 °C فانه يمكننا اختبار عينة من معدن الرصاص عند درجة حرارة الغرفـة تقريباً (27 °C) بدلاً من اختبار عينة من الفولاذ عند درجة الحرارة المرتفعـة (625 °C) .

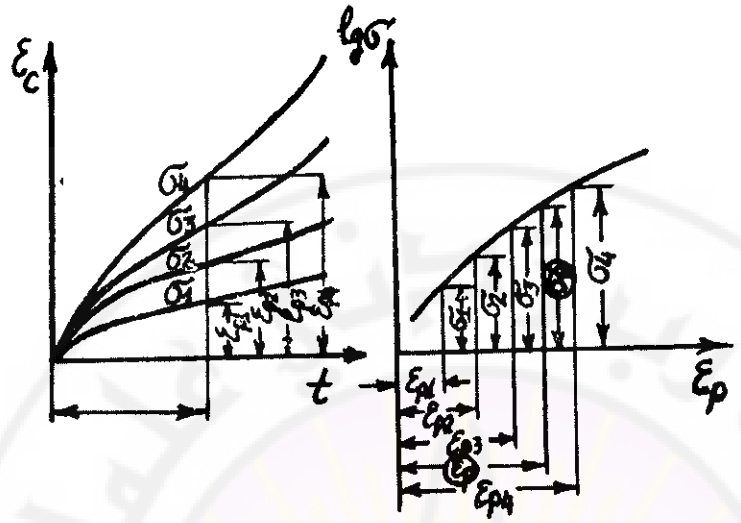
أما الخط الشاقولي (AA) فيتقاطع مع هذه المستقيمات عند درجات حرارة تناظر متباينة مما يدل على تباين سلوك الزحف عند هذه المعادن في درجة حرارة الاختبار نفسها .

٨ ــ ١٠ ــ ٥ ــ تعيين حد الزحف للمعدن :

يُعرَّف حد الزحف للمعدن (σ_p) على أنه الاجهاد الذي يسبب انفعالاً لدناً ذا مقدار محدد في المواصفات التقنية للمعدن خلال فترة زمنية معينة • كما يعرَّف 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 بكلٍ من درجة حرارة الاختبار وزمن الاختبار، ومن التعريف الثاني نستنتج أن حد الزحف يتعلق بكل من درجة حرارةالاختبار وسرعة الزحف •

فاذا أردنا تعيين حد الزحف للمعدن بناءً على التعريف الاول ــ أي انطلاقا من معرفة مسبقة لمقدار الانفعال اللدن ε_p خلال فترة زمنية t ، فاننا نرسم شاقولاً يبعد مسافة t عن محور العينات في المخطط المبيَّن على الشكل (٨ ــ 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 قيمالاجهاد σ_1 و σ_2 و σ_3 و σ_4 الموافقة لقيم الانفعال ε_{p_1} و ε_{p_2} و ε_{p_3} و ε_{p_4} بالترتيب وبعد زمن اختبار محدد t • ثم ننقل هذه القيم المستنتجة الى مخطط آخر مبيَّن على الشكل (٨ ــ ٦٨) ، ومن هذا المخطط نستطيع ايجاد حد الزحف σ_p على محور العينات بناءً على معرفة مسبقة لقيمة الانفعال ε_p على محور السينات•

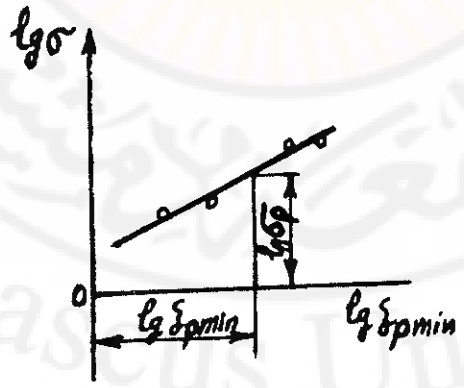
أما إذا كان المطلوب هو تعيين حد الزحف الموافق لسرعة زحف $\dot{\varepsilon}_{p\,min}$ معروفة المقدار مسبقا ، فاننا نقوم في البداية بايجاد قيم سرعات الانفعال اللدن الدنيا



الشكل (٨ ــ ٦٨)
علاقة الاجهاد بالانفعال اللدن بعد فترة زمنية محـددةمن اختبار العينات على الزحف .

الشكل (٨ ــ ٦٧)
مجموعة من منحنيات الزحف .

عند تطبيق اجهادات مختلفة على عينات من المعدن نفسه وعند درجة الحرارة نفسها ونرسم المنحني الذي يُبيِّن علاقة الاجهـاد بسرعة الانفعال اللدن الدنيا ، ثم نأخذ على محور السينات مقدار سرعـة الزحف المفروضة وعلى محور العينات نوجـد مقدار حد الزحف الموافق ولقد شرحنا هذه الطريقة بالتفصيل آنفاً .



الشكل (٨ ــ ٦٩) : علاقة الاجهاد بسرعة الزحف الدنيا في المعدن.

الفصل التاسع

المـواد غير المعدنيـة

يُنسب إلى المواد غير المعدنية تلك المواد التي تكون بنيتها الصلبـة غـير منتظمة كما في المواد المعدنية • ومن المواد غير المعدنية الزجاج واللدائن والبيتون والخشب والحجر وغيرها • ونحاول في هذا الفصل تعريف القـارىء بكـل من المتراكيب والمزايا الاساسية التي تتمتع بها بعض هذه المواد غير المعدنية •

٩ ـ ١ ـ الخشب :

كان الخشب ومازال يُستعمل في صناعات مختلفة وفي بناء بعض الانشاءات• وتتميز الإنشاءات الخشبية عن غيرها من الانشاءات المعدنية والبيتونية بخفـة وزن الأولى وسهولة تشغيلها ونقلها وتجميعها • ويتعرض الخشب بمرور الزمـن للتآكل والتلف تحت تأثير العوامل الجوية المختلفة يمكن أن يلتهب بسهولة ولا يتمتع بمرونة كبيرة عند تطبيق قوى شد أو ضغط ، إلا أن الخشب يتمتع بمتانة صدم جيدة لذلك يفضل استعماله في بناء الانشاءات التي يمكن أن تتعرض لقـوى صدم أثناء استغلالها • وعلى الرغم من توافر بعض المواد الخفيفة الاخرى كاللدائن والالمنيوم والتي يمكن أن تحل محل الخشب في بعض الصناعات إلا أن الخشب لايزال المادة المفضلة في بعض المواضع •

٩ – ١ – ١ – تركيب الخشب وبنيته :

إن الخشب مادة عضوية تتشكل طبيعياً وتتألف بشكل أساسي من عناصر انبوبية متطاولة ومتوازية تُسمى الخلايا الانبوبية ، وتختلف الخلايا الانبوبية عن بعضها بعضاً بالابعاد وسماكة الجدار وذلك تبعاً لموضع الخلية الانبوبية 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 باضافة 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 تبعا لصنف 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 سريعا ، وفي الصيف وأوائل الخريف يكون أقل سرعةً ، وفي أواخر الخريف والشتاء يكون معدل النمو مساوياً الصفر • ويكون الخشب الربيعي عادةً بلون أكشف من الخشب الصيفي ، وتظهر الحلقات السنوية للشجرة عادةً واضحة وذلك بسبب تجاور حلقات الصيف الداكنة مع حلقات الربيع الكاشفة للعام الذي يليه •

ونود أن ننوه أنه عند نمو الشجرة تصبح نهاية جذع الغصن في الشجرة محاطة 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 • فاذا كان التصنيف تجارياً فان

الخشب نوعان هما :

آ ــ الخشب الطري : ومن أنواعه خشب الصنوبر الشرقيوالغربي (وكلاهما أبيض) والصنوبر الاحمر والشوكران الشرقي والغربي والشوح والتنوب الفضي والأبيض ــ الفضي والأرز والسرو والشربين والسكوية وغيرها •

ب ــ الخشب القاسي : ومن أنواعه خشب الزان والجوز والباوط 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 :

آ ــ الخشب الخام : وهو الخشب الذي تم تهذيب أغصانه وقطعت جذوعه وفروعه إلى الحجوم القابلة للنقل والنشر •

ب ــ الخشب المسوى : وهو الخشب الذي تم تشغيله على المكشطة (أي سويّت سطوحه) •ويمكن أن تسوّى السطوح من وجه واحد أو من وجهين أو من طرف واحد ووجه واحد •••

جـ ــ الخشب المشغول : وهو الخشب الذي تم تشغيله على آلات السحج والتشكيل في ورشات النجارة بغية تركيبه في الاماكن المخصصة له•

٩ ــ ١ ــ ٣ ــ الخواص الفيزيائية للخشب :

تتباين قيم الخواص الفيزيائية بين أنواع الخشب المختلفة وحتى أنه يمكن

أن تتباين هذه القيم لاشجار من الصنف نفسه • وسوف نورد فيما يلي بعضاً من الخواص الفيزيائية للخشب•

١ً ـ محتوى الرطوبة : يحتوي الخشب على كمية من الماء تختلف بين نوع وآخر وحالة وأخرى •ويدخل الماءعادةً في جزيئات السيليلوز التي تشكل جدران الخلايا الانبوبية وفي فجوات هذه الخلايا • وعندما يصل محتوى الماء في هذه الخلايا إلى حد الاشباع فانه تتحدد أعلى نسبة للرطوبة في الخشب وعلى أساسها تقاس نسب الرطوبة الاخرى في الخشب • وتبلغ نسبة الرطوبة في الخشب الجاف ١٢ ــ ١٥٪ ، بينما يمكن أن تصل نسبة الرطوبة في الخشب الطري الى ٤٠ ــ ١٠٠٪ •

٢ً ـ انكماش الخشب وتغير ابعاده : عند تجفيف الخشب سواءً بتعرضه للتأثيرات الجوية من هواء ودرجة حرارة او تجفيفه صناعيا فانه ينكمش ويتغير محتوى الماء داخل جدران الخلايا الانبوبية • ويكون الانكماش المحيطي في عرق الخشب أكبر من الانكماش القطري • ويؤدي انكماش الخشب غير المنتظم الى إحداث إجهادات داخلية في الخشب تسبب وجود تشققات وعيوب أخرى فيه • وتحصل العيوب (بما فيها التشققات) غالباً عندما يكون التجفيف سريعاً، اذ يمكن أن يؤدي التجفيف السريع الى احداث تشققات مختلفة الاتجاهات والتواءات في عرق الخشب تسبب تشوهات كبيرة حتى في ألواح الخشب المقتطعة من الشجرة سواءً أكانت هذه الالواح قد نشرت بشكل مماسي للحلقات السنوية أم نشرت بشكل يوازي أقطار العرق •

٣ً ـ احتراق الخشب : يتعلق احتراق الخشب بعدة عوامل أهمها :

١ً ــ درجة الحرارة اللازمة لبداية الاشتعال وهي 273 °C تقريباً •

٢ً ــ وجود مواد قابلة للاشتعال تحيط بالخشب •

٣ً ــ حجم الخشب وشكله ؛ فالاطراف الرفيعة تبدأ بالاحتراق وبشكل

أسرع بينما تتأخر الأجزاء الكبيرة لتشب فيها النيران.

٤ـ التسخين المتواصل لفترة زمنية طويلة يمكن أن يسبب اندلاع النار ولو كانت درجة الحرارة أقل من درجة الحرارة اللازمة لبداية الاشتعال .

٤ـ القيمة الوقودية للخشب : تتعلق القيمة الوقودية بشكل أساسي بالوزن الجاف من الخشب وبمقدار مايحتوي عليه الخشب من مواد مختلفة كالصمغ والأحماض وبنسبة 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 :

$$Q = H \frac{100 - m_c / 7}{100 + m_c} \qquad (9.1)$$

حيث :

H ـ حرارة الاحتراق وتختلف قيمتها باختلاف نوع الخشب .

m_c ـ نسبة الرطوبة المئوية في الخشب .

٥ـ ناقلية الخشب للحرارة ومعامل تمدده 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) :

$$K = G (1,39 + CM) + 0,165 \qquad (9.2)$$

حيث : G ـ الجاذبية الخاصة وتتعلق بقيم كلٍ من حجم الخشب ووزنه ودرجة رطوبته M .

C ـ 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 (2,75 ÷ 2,25) مرة . وأما معامل التمدد الحراري للخشب فيختلف من اتجاه لآخر ، ويساوي معامل التمدد الطولي الوسطي بين درجتي الحرارة (50 °C − و 50 °C +) نحو $3{,}39 \cdot 10^{-6}$ °C .

٦ـ **ناقلية الخشب الكهرباء :** تتعلق مقاومة الخشب الكهربائية للتيار المستمر بشكل مباشر بدرجة رطوبته وبشكل غير مباشر بكل من كثافته واتجاه خطوط تشكله ودرجة حرارته وبمقدار مايحتوي عليه النسيج الخشبي من فلزات . وتتراوح مقاومة الخشب الجاف بين ($3 \cdot 10^{17} \div 3 \cdot 10^{18}$ Ω·cm) ؛ وتنخفض مقاومة الخشب للكهرباء الى المقدار (10^{8} Ω·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 فان مقاومة الخشب للكهرباء تقترب من مقاومة الماء لها وتساوي ($10^{5} \div 10^{6}$ Ω·cm) .

٧ـ **ناقلية الخشب للصوت :** تعطى ناقلية الخشب للصوت بالعلاقة التالية :

$$V = \sqrt{E / \rho} \qquad (9 \cdot 3)$$

حيث : V ـ سرعة الصوت في الخشب (in / sec.) .

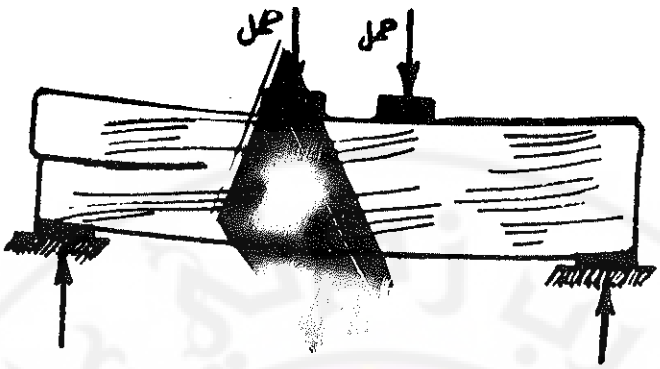
E ـ معامل المرونة للخشب أو معامل يونغ (lb / in^2) .

ρ ـ الوزن النوعي للخشب ($Sulgs / in^3$) .

ومعامل المرونة الديناميكي للخشب أكبر من معامل المرونة الستاتيكي بنحو ١٠٪ ، وتتغير قيمة هذا المعامل بتغير درجة الرطوبة ، حيث تتغير قيمته بمقدار ١٫٣٪ لكل تغير يساوي ١٪ في درجة الرطوبة •

٩ ــ ١ ــ ٤ ــ الخواص الميكانيكية للخشب :

تتأثر الخواص الميكانيكية للخشب بعدة عوامل ، فمثلا تُبيِّن التجارب المخبرية أن إجهاد الأمان العملي أصغر بكثير من الاجهاد 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 تجذعه • 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 فان القص الافقي في الجيزان الخشبية أكثر أهمية مما في الجيزان الفولاذية ويجب ادخال ذلك في الحسابات التصميمية للجيزان الخشبية • ويُبين الشكل (٩ ــ ١) انهياراً مميزاً لجائز بوساطة القص الافقي • ونود هنا أن نذكر أن متوسط قيم مقاومة المرونة العظمى للاخشاب وفي مختلف حالات التحميل ولعينات متباينة الابعاد تعطى عادةً ضمن جداول خاصة يمكن استخدامها في الحسابات التصميمية للخشب بمختلف أنواعه الطري والقاسي • ويُبيِّن الجدول (٩ ــ 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 كلٍ من مقاومة الخضوع والمقاومة القصوى تختلف اختلافاً كبيراً باختلاف نوعية الأحمال المطبقة على الخشب ومن الصنف نفسه •



الشكل (٩ ــ ١) : انهيار جائز خشبي بالقص الأفقي.

ونود أن ننوه أيضاً إلى أن ليس للخشب نقطة خضوع بارزة وإن إجهاد مقاومة الخضوع الذي يتعين عادةً بانحراف مقداره (0,05%) من الانفعال على مخطط الاجهاد ــ الانفعال يعطي معياراً جيداً لمقاومة الخضوع لمختلف أنواع الخشب الواردة في الجدول (٩ ــ ١) .

٩ ــ ٢ ــ الزجاج :

الزجاج هو ناتج لاعضوي يصنع عادةً من السيليكات المصهورة عند درجة حرارة عالية مع بعض الاضافات الاخرى 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 باذابة مركباته التي تتكون من الأكاسيد، ومن خلال التحكم بأنواع الاكاسيد المستعملة يمكن التحكم بالخواص المرغوب

الجدول (٩ ــ ١) متوسط قيم مقاومة المرونة العظمى لبعض الأخشاب في حالات مختلفة ولعينات متباينة الحجوم .

نوع الخشب	الوزن النوعي (lb/in³)	المقاومة [(lb / in²) × 1000]					
		انحناء متصالب		ضغط موازي للتجذع		ضغط عرضي التجذع	قص موازي التجذع
		مقاومة الخضوع	الاجهاد الاعظمي المسبب للانهيار	مقاومة الخضوع	الاجهاد الاعظمي المسبب للانهيار	مقاومة الخضوع	المقاومة القصوى
ا ــ خشب طري ، حجم صغير ، عينات اختبار غير مشروطة ومجففة بالهواء (نسبة الرطوبة ١٢ ٪) .							
الصنوبر الجنوبي	34	6,6	11,0	4,1	5,8	0,9	0,8
الشوح	28	6,7	10,4	3,8	5,0	0,8	0,5
الصنوبر الابيض	24	6,4	7,9	3,8	5,4	0,7	0,4
الشوكران الشرقي	28	6,3	10,4	4,6	5,4	0,6	0,4
السكوبة	22	4,8	7,8	3,9	5,1	0,56	0,35
التنوب	39	8,4	10,0	5,7	7,3	0,7	0,8
الأرز	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

٣ ــ خشب قاس ، حجم صغير ، عينات اختبار غير مشروطة ، مجففة بالهـواء (نسبة الرطوبة ١٢ ٪) .

السنديان الأبيض	50	9,6	13,1	5,0	8,5	2,2	1,0
السنديان الأحمر	45	9,2	11,4	4,5	7,2	2,3	1,1
الجوزة الامريكية	50	11,5	16,0	5,5	10,0	2,7	1,15
الـدرداء	39	7,9	10,8	4,0	6,0	1,9	1,10
البقيصاء	34	7,3	10,3	5,5	6,5	1,2	0,8
القيقب	43	5,0	7,0	5,5	8,0	1,3	0,5

في الحصول عليها في الزجاج مثل معامل التمدد وزاوية انحراف الضوء أثناء مروره بالزجاج وخواص أخرى •

٩ ـ ٢ ـ ١ ـ تصنيع الزجاج : تصل درجة انصهار الزجاج العادي إلى نحو 1493 °C ، أما درجة الحرارة التي يفقد عندها هذا الزجاج خواصه العجينية ويتجمد فهي نحو 594 °C . وتختلف درجات الحرارة آنفة الذكر باختلاف تركيب الخلطة الزجاجية •

تتنوع أفران صهر الخلطات الزجاجية فمنها البدائية اليدوية ومنها الافران ذات التقنية العالية والتي تستخدم في صناعة المصابيح الكهربائية وغيرها كالافران الرصاصية والمنغنيزية ••• الخ • وبعد أن يتم صهر الخلطة الزجاجية المناسبة تُغرف 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 الاكاسيد التالية: SiO_2 و Al_2O_3 و CaO و Na_2O . أما الزجاج الخاص (الزجاج الليفي) فان تركيبه يشبه تركيب الزجاج العادي مضافاً اليه بعض الاكاسيد 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 ـ ٢ ـ ٢ ـ أنواع الزجاج : تتعدد أنواع الزجاج وذلك تبعاً لتركيبه ومجالات استخدامه ونورد فيما يلي بعضاً من أنواع الزجاج شائعة الاستخدام :

١ً ـ 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 ($\frac{1}{6}$ in و $\frac{1}{8}$ in) •

٢ً ــ الزجاج العاكس : وهو الزجاج المطلي بطلاء عاكس • وتختلف نفاذية الاشعة الضوئية عبر هذا الزجاج باختلاف نوع الطلاء المستعمل وتتراوح بين ٨ ــ ٥٠٪ •

٣ً ــ الزجاج البورسيليكي : وهو من أقدم أنواع الزجاج ويتمتع بمقاومة عالية للحرارة وللصدمات ، ويستخدم في صناعة المصابيح والاواني المخبرية وأدوات المطبخ وغيرها •

٤ً ــ الزجاج الألومين سيليكي : يشبه في تركيبه الزجاج البورسيليكي مع بعض الاضافات ، ويتحمل هذا الزجاج درجات الحرارة العالية ويستعمل في صناعة أدوات المطبخ والمصابيح وغيرها • وعند طلائه فانه يستعمل كعناصر مقاومة في الدارات الالكترونية •

٥ً ــ الالواح 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 •

٦ً ــ زجاج الأمان : ويتألف من طبقتين من الالواح الزجاجية يتم لصقهما ببعضهما بوساطة طبقة من مادة عضوية خاصة ، ويمكن الحصول على زجاج أمان بسماكات مختلفة ويستعمل في زجاج النوافذ العادية ونوافذ غرف المحاسبة في البنوك وغيرها •

٧ً ــ الزجاج المقسّى : وتبلغ سماكته (1 in) ويتمتع هذا الزجاج بمتانة ميكانيكية عالية • ويتم الحصول على هذه المتانة بإجراء التبريد السريع للسطوح

العملية أيضا الى جعل الزجاج مقاوما للصدمات •

٨ً ــ الزجاج الشريطي: وهو الزجاج الذي مدت بداخله أسلاك دقيقة جداً من الحديد • ويبدي هذا الزجاج مقاومة أكبر بمرة ونصف المرة من مقاومة الزجاج العادي • ويمكن السير بالاقدام حتى على الالواح الرقيقة من هذا الزجاج • وعند تعرضه للكسر فانه لايتحطم الى قطع صغيرة كالزجاج العادي • ويتحمل هذا الزجاج الصدمات ودرجات الحرارة العالية ويستعمل في صناعة الابواب والجدران المانعة لانتشار الحريق وفي أماكن أخرى •

٩ً ــ الزجاج المضغوط : ويتم الحصول عليه بمعاملة الزجاج (الذي تم جعله ليناً بالتسخين) بضغوط معينة • ويستعمل هذا الزجاج في صناعة أدوات المائدة والعدسات والعوازل وغيرها •

٩ ــ ٢ ــ ٣ ــ اهم الخواص الفيزيائية للزجاج : إن من أهم الخواص الفيزيائية للزجاج خاصتين هما :

١ً ــ اللزوجة : كي تتمكن من القيام بأي خطوة من خطوات صهر الزجاج وتصنيعه يجب أن نأخذ بعين الاعتبار هذه المقاومة للانسياب والحركة في درجات الحرارة المختلفة وذلك عند تطبيق قوى مختلفة عليه • وتدعى هذه المقاومة للحركة والانسياب باللزوجة ويعبر عنها كما هو معروف بواحدة البواز (poise) والتي تعرّف 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 •

٢ً ــ 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 لايتمدد بشكل متجانس خلال كل مجال من مجالات درجات الحرارة •

٩ ـ ٣ ـ اللدائن (البلاستيك) :

تعرّف 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 الاخرى 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 ولتلائم هذه الاصناف 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 مايستهلكه الفرد الواحد من المواد البلاستيكية سنوياً هو أحد المعايير التي تحدد درجة رقي البلد .

٩ ـ ٣ ـ ١ ـ بنية البلاستيك :

يتألف البلاستيك بشكل أساسي من البوليمير وهي مادة عضوية ترتبط جزيئاتها مع بعضها بأعداد كبيرة جداً لتشكل ما يُسمى الجزيئات المتعددة العالية، ويُخلط 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 اتيلين) أو بشكل تفرعات فراغية (كالبكاليت) . 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 :

١ً ــ الملدنات : وهي مواد تضاف بغية جعل البلاستيك طرياً ولدناً في درجات الحرارة السالبة ومنها مواد تضاف بهدف جعل البلاستيك سهل التصنيع والتشغيل •

٢ً ــ 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 •

٣ً ــ المواد الحجمية : وهي مواد رخيصة تخلط 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 •

٤ً ــ المواد الحافظة : وهي مواد تحد من تأثير بعض الآفات ونشاطها التي التي تؤثر في الخواص الميكانيكية للمواد البلاستيكية وعازليتها الكهربائية وتجانس ألوانها • وغالبا ماتكون الملدنات نفسها مواد حافظة •

٥ً ــ مواد التقوية : وهي مواد تؤمن الارتباط الجيد بين مركبات البلاستيك وتتمتع بخواص جيدة مثل مقاومة الشد وخفة الوزن والخواص الكهربائية الجيدة أيضا •

٦ً ــ 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 •

٧ً ــ مواد معيقة للاشتعال : وهي مواد تكسب المنتج المصنع خاصية عدم سريان اللهب في جزيئاته القابلة للاشتعال •

٨ً ــ 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 •

٩ً ــ 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 الاولية قبل تصنيعها •

وهناك مواد مضافة أخرى مثل المواد المزلقة والمواد الرغوية والمواد المضادة للأكسدة ولكلٍ منها مهمته المحددة في اكساب المنتج البلاستيكي بعض المزايا الخاصة •

٩ ــ ٣ ــ ٢ ــ تصنيف البلاستيك :

هناك مجموعة من السمات التي يمكن اتباعها عند تصنيف البلاستيك كالتصنيف حسب التركيب الكيميائي أو حسب المنشأ (طبيعيا 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 :

١ً ــ 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•

٢ً ــ البلاستيك المستقر حراريا : ويتميز هذا النوع بأنه لا يلين عند رفع درجة

حرارته بعد الانتهاء من المرحلة الأخيرة من انتاجه ، 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 ننوه الى أن أشهر أنواع البلاستيك اللدن حراريا هي البولي ايتلين والبولي فينيل كلوريد والبوليسترول والزجاج العضوي • أما أشهر أنواع البلاستيك المستقر حرارياً فهي البكاليت والجليفتال وغيره •

٩ ــ ٣ ــ ٢ ــ الخواص الفيزيائية للبلاستيك :

يتمتع البلاستيك بمجموعة من الخواص الفيزيائية مثل : خفة الوزن حيث يتراوح الوزن النوعي لجميع المنتجات البلاستيكية بين (٠٫٦ ــ ٢٫٥ غ/سم^{٣}) والشفافية ، إذ يكون البلاستيك الذي لا يحتوي على مواد مضافة وسماكته قليلة شفافاً وقابلاً لإنفاذ الضوء ، وخاصية التلوين حيث يمكن إعطاء البلاستيك اللون المطلوب بسهولة وبشكل متجانس • ولكن أهم الخواص الفيزيائية للبلاستيك هي:

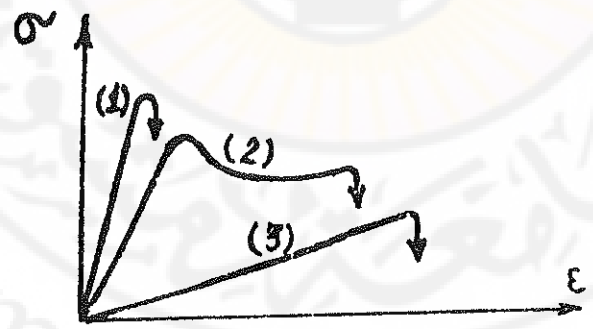
١ً ــ سرعة التجمد : يتميز البلاستيك بسرعة تحوله الى الحالة الجامدة بعد صبه أو حقنه في القالب • وتساعد هذه الخاصية على سرعة إنتاج البلاستيك وخفض الكلفة في إنتاجه •

٢ً ــ العزل الكهربائي والصوتي والحراري : تتميز أنواع البلاستيك المختلفة (وبخاصة اللدنة حراريا) 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 $\frac{١}{١٠٠}$ من ناقلية الحديد •

٣ــ 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 ــ ٣ ــ ٤ ــ الخواص الميكانيكية للبلاستيك :

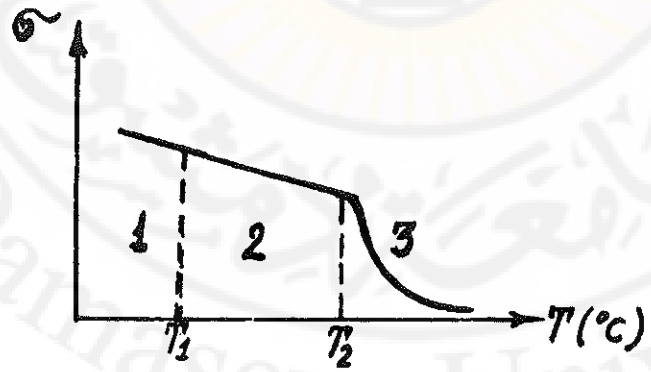
تتباين الخواص الميكانيكية للبلاستيك بين نوعٍ وآخر وذلك تبعاً لتركيبه وحالته ونوع الحمل المطبق • فاذا أثرنا في نماذج مختلفة من البلاستيك بإجهادات شد نلاحظ أن من بين هذه النماذج ما ينفعل بمقدار ١٠٠ ــ ٥٠٠٪ ومنها ماينفعل بمقدار ٢ ÷ ٥٪ فقط وذلك قبل حدوث الانهيار • ويبيّن الشكل (٩ــ٢) ثلاثة منحنيات شد مختلفة فيما بينها لكلٍ من المواد البلاستيكية اللدنة والمستقرة حرارياً • فمن 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 ــ ٢) : منحنيات الشد لأنواع مختلفة من البلاستيك اللدن والمستقر حرارياً .

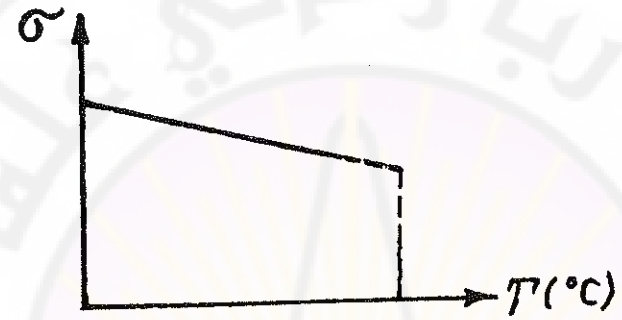
حالة الانفعال الهش للبلاستيك ، أما المنحني (2) فيوافق حالة الانفعال اللدن ، إذ كما نلاحظ من الشكل يكون مقدار الانفعال كبيرا جدا قبل حدوث الانهيار الكامل للعينة ، وأما المنحني (3) فيوافق حالة الانفعال المطاطي (كما يُسمى عادةً) .

تؤثر درجة الحرارة في قيم الإجهاد المسبب للانهيار للصنف نفسه من البلاستيك . فمن الشكل (٩ــ٣) 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 اجهاد 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 حدٍ كبير وسلوك الانهيار مطاطي (كما يُسمى عادةً) .



الشكل (٩ ــ ٣) : علاقة اجهاد 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 التأثر بالحرارة غير المرتفعة (حتى ٣٠٠ ــ ٤٠٠° م) وبمعنى آخر يبقى تأثير الحرارة ضعيفا حتى يحدث تحلل البلاستيك وتضعف الروابط بين جزيئاته • ومن



الشكل (٩ ــ ٤) : علاقة اجهاد انهيار البلاستيك المستقر حراريا بدرجة الحرارة .

الشكل (٩ ــ 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 مفاجىء ناتج عن تعرضه لقوى صدم أو لإجهادات تعبية ، كما يمكن تحسين هذه الخواص في البلاستيك بإضافة نسبة معينة من المواد المناسبة لخليطة البلاستيك •

* * *


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

جدول المصطلحات العلمية

مرتبة حسب ابجدية اللغة الانكليزية

بالانكليزيـــة	بالفرنسية	بالعربيـــة
	— A —	
Absorption	Absorption	امتصاص
Allotripic transformations	Tronsformations 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 التمركز الوسطي
Brass	Laiton	النحاس الاصفر
Bronze	Bronze	البرونز
Brittlness	Fragilitt	هشاشية
	— C —	
Carbon Steel	Acier non allié	الفولاذ الفحمي
Cast iron	Fonte	حديد صب
Cathode	Cathode	مهبط
Cementite	Cémentite	سمنتيت

بالانكليزيـة	بالفرنسية	بالعربيـة
Characterеristic ray	Rayon caracteristique	الاشعة المميزة
Contruction	Striction	اختناق
Constantan	Constantan	الكونستنتان
Copper	Cuivre	النحاس
Corrosion	Corrosion	التاكسد (التآكل بالتاكسد)
Creep	Fluage	الزحف
Creep Strengthe	Resistance au fluage	مقاومة الزحف
Crystal lattice	Réseau	الهيكل الشبكي للبلورة
Curie point	Point de Curie	نقطة كوري (للتحول المغناطيسي)

— D —

Degree of freedom	Dégré de liberté	درجة الحرية
Dendritic Structure	Structure dendritique	البنية الدندريتية (الغصينية)
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 elestique	التغير المرن (التشوه المـرن)
Elastic Limit	Limite d'élasticité	حد المرونة
Endurance Limit	Limite d'endurance	حد الصمود
Equilibrium diagrams	diagammes d'équilibre	مخططات التوازن

بالانكليزيـــة	بالفرنسية	بالعربيـــة
Etching	Attaque	التخريش
Eutectic point	Point eutectique	النقطة اليوتكتيكية
Eutectoid point	Point eutectoide	النقطة اليوتكتويدية
Extrapolation	Extrapolation	التقريب الخارجي

— F —

Face Centred Lattice	Réseau faces centreés	الهيكل الشبكي ذو التمركزات الوجهية
Fatigue	Fatigue	التعـب
Fatigue Strength	Résistance à la fatigue	مقاومة التعب
Faltigue Limit	Limite de fatigue	حد التعب
Ferrite	Ferrite	الفريت
Ferromagnetic	Ferromagnétigue	فرومغناطيسية
Fracture	Fracture	كسر ، تحطم
Free energy	Énergie libre	القدرة الحرة

— G —

Gibbs phase rule	La régle des phases de Gibbs	قاعدة الطور لجيبس
Grain boundaries	Frontiéres des grains	حدود الحبيبات
Grain growth	Croissance du grain	نمو الحبيبات
Grain size	Grosseur du grain	حجم الحبيبات

— H —

Hardenability	Trempabilité	قابلية التقسية
Hardening	Trempe	التقسية

بالانكليزيـــة	بالفرنسية	بالعربيـــة
Hardness	Dureté	القساوة
Heat treatment	Traitement thermique	المعالجة الحرارية
Homogeneus	Homogéne	متجانس
Hetarogeneus	Hétérogéne	غير متجانس
Hysteresis Loop	Cycle d'hystérésis	منحني الهسترة
Hypereutectic	Hypereutectique	فوق يوتكتيكي
Hypereutectoid	Hypereutectoide	فوق يوتكتويدي
Hypoeutectic	Hypoeutectique	تحت يوتكتيكى
Hypoeutectoid	Hypoeutectoide	تحت يوتكتويدي
	— I —	
Impact	Impact , choc	الصدم
Induction	Induction	التحريض
Intercrystalline	Intercristalline	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 ميللر
Monochromatic	Monocromatique	وحيد اللون
	— N —	
Neutral	Neutre	معتدل

بالانكليزيـــة	بالفرنسية	بالعربيـــة
Notch	Encoshe	حز ، ثلمة
Nucleus	Noyau	نـواة

— P —

Paramagnetic	Paramagnetique	بارامغناطيسية
Parameters	Parametres	مقاييس ، أبعاد
Pearlite	Perlite	البرليت
Peritectic	Péritectique	البريتكتيكي
Phases	Phases	اطـوار
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 للالكترونات

— R —

Recrystallisation	Recristallisation	اعادة التبلور
Reversible	Réversible	ظاهرة قابلة للانعكاس

بالانكليزيـــة	بالفرنسيـة	بالعربيـــة
Rontgen rays	Royons de Rontben	اشعة رونتجن (الاشعة السينية)
Rupture	Rupture	انقطاع ، تحطم
	— S —	
Segregation	Ségrégation	الانفصال الصلب . الترسب
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	اجهـــاد
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

بالانكليزيـــة	بالفرنسية	بالعربيـــة

— W —

Wohler Test	Teste re Wohler	اختبار فولر

— Y —

		حد الانسياب ،
Yield point	Point de fléchissement	حد الاستسلام
Young's Modulus	Module d'young	عامل يونغ



Damascus University

المراجع

المراجع العربية :

١ـ المعادن « خواصها ـ اختباراتها ـ معالجتها الحرارية » : د. جميل ابو جهجاه ؛ مطبعة دار الحياة ، دمشق ، ١٩٨١ .

٢ـ خواص المواد واختبارها : م. محمد عدنان فرواتي ، منشورات جامعة حلب ؛ ١٩٨٥ .

٣ـ البلاستيك وآلاته : د. معتز جاويش ، مطبعة خالد بن الوليد ، ١٩٨٩ .

٤ـ علم المعادن الفيزيائية : د. احمد سالم الصباغ ، منشورات مكتبة اسكندرون ، حلب .

٥ـ علم المعادن والمعاملة الحرارية للمعادن : يو. لاختين ، دار مير للطباعة والنشر ، موسكو ١٩٨٣ م

٦ـ البحث في مقاومة الانشاءات اللحامية الفولاذية عالية المتانة للتصدع التعبي والهش : د. محمد علي سلامة ، أطروحة للحصول على لقب دكتور فلسفة في العلوم التقنية ، لينينغراد ١٩٨٢ .

المراجع الأجنبية :

7- Гуляев А.П. „Металловедение" - изд. Металлургия, М., 1977.

8- Школьская М.П. „Кристаллография" - изд. Высшая школа, М., 1976.

9- Когаев В.П. „Расчеты на прочность при напряжениях, перешенных во времени" - изд. Масшиностроение, 1977.

10- Труфяков В.М. „Усталость сварных соединений" - изд. Наукова 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.

الموضـــوع	الصفحة

الفصل الخامس : بنيـة الخلائط المعدنيـة ١٢٣

٥ـ١ـ المزيج الميكانيكي ١٢٤

٥ـ٢ـ المركب الكيميائي ١٢٤

٥ـ٣ـ محلول معدني صلب قاعدته احد عناصر الخليطة ١٢٧

٥ـ٤ـ محلول معدني صلب قاعدته مركب كيميائي ١٣١

٥ـ٥ـ المحلول المعدني الصلب المنتظم ١٣٣

٥ـ٦ـ المركبات الالكترونية ١٣٥

٥ـ٧ـ المركبات الكيميائية المعقدة ١٣٦

٥ـ٨ـ المركبات التداخلية (الأطوار التداخلية) ١٣٨

٥ـ٩ـ قاعدة الطور ١٣٩

الفصل السادس : مخططات توازن الخلائط المعدنية ١٤٢

٦ـ١ـ ملاحظات عامة حول انشاء مخطط التوازن ١٤٢

٦ـ٢ـ كيفية إنشاء مخطط التوازن تجريبياً ١٤٤

٦ـ٣ـ الاستنتاجات الممكنة من مخطط التوازن ١٥٠

٦ـ٤ـ قانون العتلة واستخداماته في مخططات التوازن ١٥٦

٦ـ٥ـ مخططات التوازن النظرية ١٥٩

٦ـ٦ـ مخططات التوازن الخلائط التي تتمتع مكوناتها بتغيرات آلوتروبية ١٨٣

الفصل السابع : أهم الخواص الفيزيائية للمعادن والخلائط المعدنية ١٩١

٧ـ١ـ الوزن النوعي للمعادن والخلائط المعدنية ١٩١

٧ـ٢ـ الخواص الحرارية للمعادن والخلائط المعدنية ١٩٣

٧ـ٢ـ١ـ الحرارة النوعية ١٩٣

٧ـ٢ـ٢ـ الحرارة النوعية الذرية ١٩٥

الموضـــوع	الصفحة

٧ـ٢ـ٣ـ حرارة الانصهار	١٩٥
٧ـ٢ـ٤ـ حرارة التغير الألوتروبي	١٩٦
٧ـ٢ـ٥ـ اختزان الحرارة	١٩٦
٧ـ٢ـ٦ـ التمدد الحراري	١٩٧
٧ـ٣ـ ناقلية الكهرباء والحرارة عند المعادن والخلائط المعدنية	٢٠٠
٧ـ٣ـ١ـ ناقلية المعادن النقية للتيار الكهربائي	٢٠٠
٧ـ٣ـ٢ـ تأثير الحرارة على ناقلية المعادن للتيار الكهربائي	٢٠٢
٧ـ٣ـ٣ـ تأثير التشكيل والتطرية على ناقلية المعادن للتيار الكهربائي	٢٠٤
٧ـ٣ـ٤ـ ناقلية الخلائط المعدنية للتيار الكهربائي	٢٠٤
٧ـ٣ـ٥ـ ناقلية المعادن والخلائط المعدنية الحرارة	٢٠٧
٧ـ٤ـ الخواص الكهروحرارية للمعادن والخلائط المعدنية	٢٠٨
٧ـ٥ـ الخواص المغناطيسية للمعادن والخلائط المعدنية	٢١١
٧ـ٦ـ انتشار الذرات في المعادن والخلائط المعدنية	٢١٦
الفصل الثامن : الخواص الميكانيكية للمعادن والخلائط المعدنية واختباراتها	٢٢٠
الاختبارات الستاتيكية	٢٢
٨ـ١ـ اختبار الشد	٢٢٢
٨ـ١ـ١ـ اختيار العينات	٢٢٢
٨ـ١ـ٢ـ الآلات المستخدمة في اختبار الشد	٢٢٣
٨ـ١ـ٣ـ قياس الانفعال	٢٢٥
الطريقة البسيطة	٢٢٥
الطريقة الميكانيكية	٢٢٥
الطريقة الكهربائية	٢٢٧
الطريقة الضوئية	٢٢٩

الموضـــوع	الصفحة
٢ـ١ـ انكماش الخشب وتغير أبعاده	٣٤٣
٢ـ٣ـ احتراق الخشب	٣٤٣
٢ـ٤ـ القيمة الوقودية للخشب	٣٤٤
٢ـ٥ـ ناقلية الخشب للحرارة ومعامل تمدده الحراري	٣٤٤
٢ـ٦ـ ناقلية الخشب للكهرباء	٣٤٥
٢ـ٧ـ ناقلية الخشب للصوت	٣٤٥
٩ـ١ـ٤ـ الخواص الميكانيكية للخشب	٣٤٦
٩ـ٢ـ الزجاج	٣٤٧
٩ـ٢ـ١ـ تصنيع الزجاج	٣٥١
٩ـ٢ـ٢ـ انواع الزجاج	٣٥١
٩ـ٢ـ٣ـ اهم الخواص الفيزيائية للزجاج	٣٥٢
٩ـ٣ـ اللدائن (البلاستيك)	٣٥٣
٩ـ٣ـ١ـ بنيـة البلاستيك	٣٥٣
٩ـ٣ـ٢ـ تصنيف البلاستيك	٣٥٥
٩ـ٣ـ٣ـ الخواص الفيزيائية للبلاستيك	٣٥٦
٩ـ٣ـ٤ـ الخواص الميكانيكية للبلاستيك	٣٥٧
جدول المصطلحات العلمية	٣٦٠
المراجع العربية والأجنبية	٣٦٧

