Mouvement d'impuretés dans le champ de contrainte d'une dislocation - Nuages de Cottrell

DEA de physique statistique et phénomènes non linéaires
Cours de physique de la matière condensée

Référence: Y. Quéré, Physique des Matériaux, Ellipses.

On considère une dislocation coin, dirigée suivant l'axe Oz et dont le vecteur de Burgers $\vec{b}$ est dirigé suivant Ox. Cette dislocation se trouve dans un matériau cristallin qui contient des impuretés diluées (supposées toutes identiques) dont on notera $c(\vec{r}, t)$ la concentration. Loin de la dislocation, cette concentration est c_0

A une impureté est associé un "volume d'excès" δV , qui traduit le fait que sa taille étant différente de celle des autres atomes il y'a dans son voisinage une dilatation ($\delta V > 0$) ou une contraction ($\delta V < 0$) locale du réseau.

On peut montrer que en présence de la dislocation coin, l'énergie potentielle d'une impureté s'écrit sous la forme:

$$W(r, \theta) = K \frac{bG(\delta V) \sin \theta}{r} \quad (1)$$

où on a repéré la position de l'impureté par ses coordonnées cylindriques. r est donc la distance à l'axe Oz, θ l'angle avec l'axe Ox. G est le module de cisaillement du solide, K une constante numérique ($K = 1/3\pi$), et b le module du vecteur de Burgers.

- 1) Faire un schéma précisant la situation et les notations.
- 2) Expliquer **qualitativement** l'origine de l'énergie potentielle (1), et des différents facteurs la composent. Discuter en particulier la variation en fonction de r , θ , et du signe de δV .
- 3) Ecrire l'équation qui régit l'évolution de $c(\vec{r}, t)$ sous l'effet combiné de la diffusion et de la force qui dérivent de l'énergie potentielle (1). On notera D le coefficient de diffusion des impuretés.
- 4) Quelle est la solution stationnaire d'équilibre de cette équation? (NB: on ne cherchera pas à résoudre explicitement l'équation). En supposant cette solution stationnaire atteinte, quelle est l'allure des lignes d'isoconcentration dans le plan xOy ?
- 5) Montrer que la solution stationnaire ne peut pas être correcte au voisinage de $r = 0$. Quels phénomènes faudrait il prendre en compte pour étudier le voisinage de $r = 0$ de manière quantitative?
- 6) Sachant que la solubilité de l'impureté dans le matériau est finie, quel phénomène va être observé dans le voisinage de la dislocation?
- 7) Calculer l'ordre de grandeur de la taille de l'amas d'impuretés formé autour de la dislocation. On pourra prendre par exemple la ligne d'isoconcentration $5c_0$. On utilisera des valeurs raisonnables pour G , δV et b .
- 8) Justifier que la formation de ces "nuages de Cottrell" tend à durcir le matériau.

On s'intéresse maintenant à l'aspect dynamique. Pour cela on va envisager le cas (plus simple) d'une dislocation vis située sur l'axe Oz. On montre alors que l'énergie potentielle de l'impureté est de la forme

$$W(r, \theta) = K' \frac{bG(\delta V)}{r} \quad (2)$$

- 9) Justifier l'absence de dépendance en θ dans l'équation (2).

10) On suppose que à l'instant initial les impuretés sont réparties de manière uniforme dans le volume. Expliquer alors pourquoi on peut initialement négliger le courant de diffusion.

11) Dans cette approximation, montrer que le nombre d'impuretés qui ont rejoint le voisinage de la dislocation après un temps t est proportionnel à $t^{2/3}$, et préciser le coefficient de proportionnalité.

On pourra raisonner de la manière suivante: la vitesse d'une impureté est en l'absence de diffusion proportionnelle à la force qui lui est appliquée. On calculera donc dans un premier temps le temps $t(R)$ que met une impureté pour rejoindre la dislocation (c'est à dire pour arriver en $r = 0$) lorsqu'elle part à $t = 0$ d'une distance R . On exprimera ensuite le fait que au bout du temps $t(R_0)$, toutes les impuretés qui étaient initialement contenues dans un cylindre de rayon R_0 ont rejoint la dislocation.