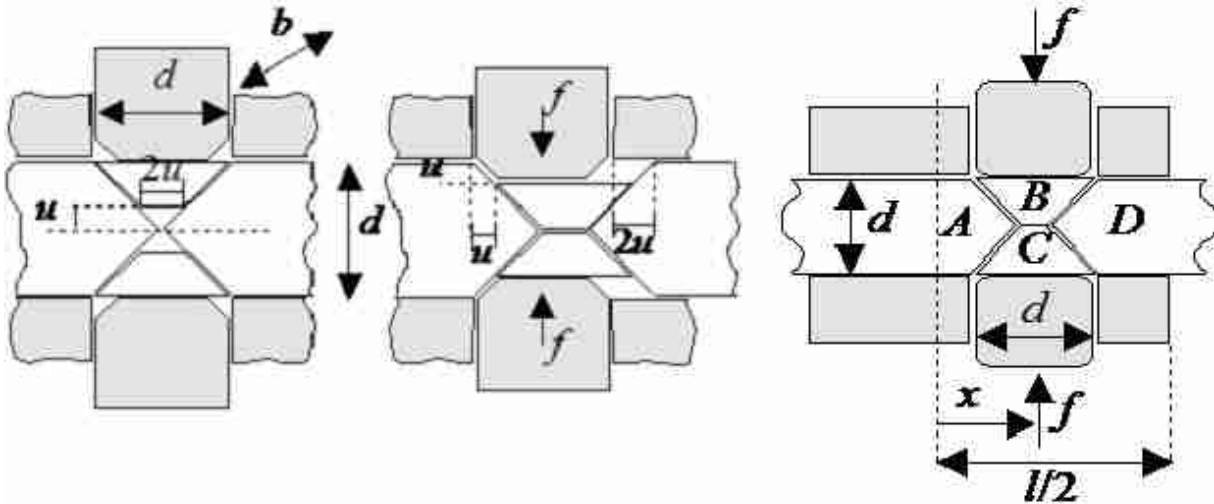
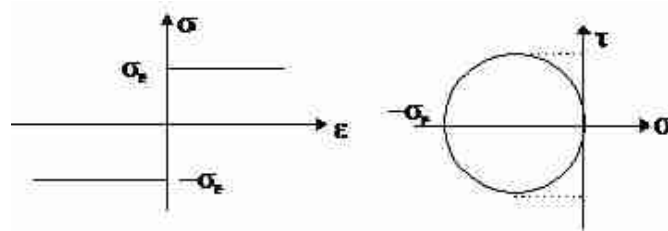


Forgeage et laminage

1°) la déformation plastique s'effectuant par cisaillement, donc par glissement de la matière à $\frac{\pi}{4}$ de l'axe de compression, le bloc élémentaire doit se présenter sous la forme d'un carré car ses diagonales forment bien un angle de $\frac{\pi}{4}$ avec l'axe de compression, ce qui ne serait pas le cas d'un rectangle. La largeur d de l'élément mobile de plateau doit donc être égale à l'épaisseur d du lingot.



2°) Lors d'un enfoncement virtuel u de chaque élément de plateau, le travail fourni par la presse est $W_f = 2fu$. Ce travail est absorbé par les efforts de résistance au glissement des 4 facettes à $\frac{\pi}{4}$ des parties A, B, C, D . Chacune de ces facettes présente une surface $S = bd\frac{\sqrt{2}}{2}$ et subit un déplacement dans son plan $\Delta = u\sqrt{2}$. La contrainte de cisaillement qui autorise ce glissement étant égale à la limite d'écoulement au cisaillement k du métal, le travail total absorbé W_a est égal à $4kS\Delta$ soit $W_a = 4kbd u$. L'égalité des travaux $W_f = W_a$ conduit à l'expression de la force pressante $f = 2kbd = \sigma_e bd$.



Dans l'hypothèse d'une loi plastique parfaite la limite d'écoulement plastique au cisaillement k est égale à la moitié de la limite d'écoulement plastique en compression σ_e (voir cercle de Mohr). $\sigma_e = 2k$ et la pression de formage vaut $p(x) = \frac{f}{bd} = \sigma_e$. Ce résultat était directement prévisible puisque la déformation plastique ne peut débuter en compression que sous l'action d'une contrainte de compression p imposée par les plateaux égale à la limite d'écoulement en compression σ_e du métal.

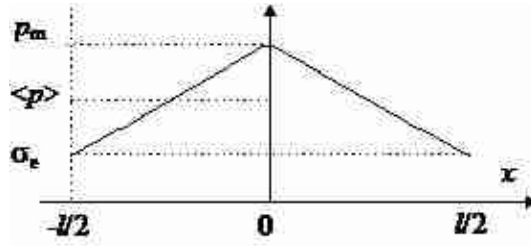
3°) Le bilan d'énergie doit être modifié pour prendre en compte le travail de frottement entre les parties du lopin qui se déplacent horizontalement le long des plateaux. Sous l'action de la contrainte normale σ_e les parties B et C ayant chacune une surface de contact bd avec les plateaux présente une force de résistance au déplacement $f_t = \mu\sigma_e bd$. Le travail absorbé par frottement par les parties B et C lors de leur déplacement horizontal u est égal à $2f_t u$ soit $2\mu\sigma_e bdu$. La partie D présente une surface frottante totale sur les deux plateaux est égale à $2b(\frac{l}{2} - x - \frac{d}{2})$. Lors de son déplacement horizontal $2u$ elle absorbe donc un travail $2\mu\sigma_e b(l - 2x - d)u$. Le travail absorbé total est maintenant la somme du travail de déformation plastique et du travail de frottement :

$$W_a = 2\sigma_e bdu + 2\mu\sigma_e b(l - 2x - d)u + 2\mu\sigma_e bdu = 2\sigma_e bu(d + \mu(l - 2x))$$

Le bilan devient :

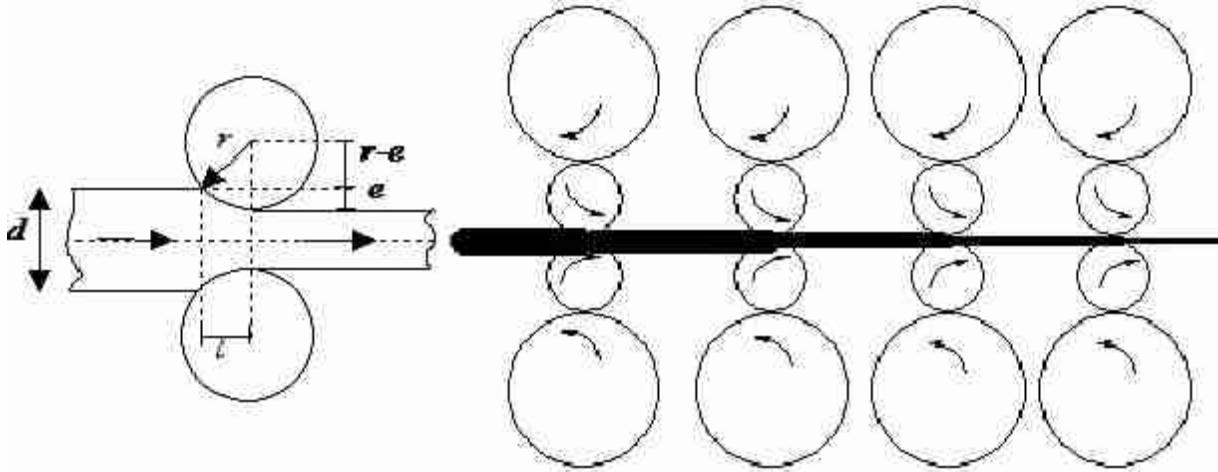
$$W_f = 2fu = W_a = 2\sigma_e b u (d + \mu(l - 2x)) \quad f = \sigma_e b (d + \mu(l - 2x)) \quad p(x) = \frac{f}{bd} = \sigma_e \left(1 + \mu \frac{l-2x}{d}\right)$$

$$p_m = \sigma_e \left(1 + \mu \frac{l}{d}\right) \quad \langle p \rangle = \sigma_e \left(1 + \frac{\mu}{2} \frac{l}{d}\right)$$



4°) La contrainte de déformation d'écrasement plastique $\sigma = \sigma_e$ est suffisante pour réaliser une *soudure par pression* liaison intime à l'échelle atomique entre plateau et lopin. Le glissement horizontal n'interviendra que lorsque la contrainte de cisaillement τ atteindra une valeur proche de la limite d'écoulement plastique au cisaillement k . L'ordre de grandeur du coefficient de frottement $\mu = \frac{\tau}{\sigma} \approx \frac{k}{\sigma_e} = \frac{1}{2}$. Pour un rapport $\frac{l}{d}=10$, le rapport $\frac{p_m}{\sigma_e}$ prend la valeur 6. Il y a donc un sérieux risque de déformation plastique de l'outil de forgeage lui même métallique. Aussi le forgeage s'effectue habituellement à chaud, le lopin étant porté à une température de l'ordre de 0,7 fois sa température de fusion afin qu'il se *ramollisse*. En terme de mécanique cela revient à abaisser fortement sa limite d'écoulement plastique σ_e réduisant considérablement l'effort sur l'outil de forgeage dont on limite l'échauffement par refroidissement ou par travail au choc (temps de contact bref) comme le fait le forgeron avec son marteau.

5°) Dans le cas du forgeage à froid, la géométrie du laminage permet d'écrire $l^2 + (r - e)^2 = r^2$, soit $l = r\sqrt{1 - (1 - (\frac{e}{r})^2)}$ et en admettant raisonnablement que le rapport $\frac{e}{r} \ll 1$, l se réduit à $l = \sqrt{2re}$ soit $\frac{l}{d} = \sqrt{\frac{2r}{d}} \sqrt{\frac{e}{d}}$



Utilisant les expressions de la pression maximale $p_m = \sigma_e \left(1 + \mu \frac{l}{d}\right) = \sigma_e \left(1 + \mu \sqrt{\frac{2r}{d}} \sqrt{\frac{e}{d}}\right)$ et de la pression moyenne $\langle p \rangle = \sigma_e \left(1 + \frac{\mu}{2} \frac{l}{d}\right) = \sigma_e \left(1 + \frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{2r}{d}} \sqrt{\frac{e}{d}}\right)$ de laminage qui en découlent, le laminage des feuilles d'aluminium ménager avec $\mu = 0.5$, $d=30 \mu\text{m}$, $e = \frac{d}{4}$, $r=3 \text{ mm}$, $b=25 \text{ cm}$ et $\sigma_e=40 \text{ Mpa}$, conduit à une longueur de laminage $l = \sqrt{2re}=212 \mu\text{m}$ et un rapport $\frac{p_m}{\sigma_e} \approx 4.5$. La charge linéique moyenne s'établit à $q = \langle p \rangle l = 23,5 \text{ kNm}^{-1}$ et la force totale de pressage $F = qb = 5,87 \text{ kN}$ (presque 600 kgf).

6°) La flèche δ prise par un cylindre de rayon r et de largeur b soumis à une charge linéique q étant :

$$\delta = \frac{5}{96\pi} \left(\frac{b}{r}\right)^4 \frac{q}{E}$$

la flèche prise par chacun des cylindres du laminoir est $\delta \approx 94$ mm avec $E=200$ GPa. Ce résultat qui n'est qu'un ordre de grandeur puisque obtenu par une approche résistance des matériaux qui sous-entend $\frac{\delta}{2r} \ll 1$ montre cependant que la conception d'un train de laminoir est une opération complexe puisqu'il faut trouver le moyen de limiter la flèche prise par les cylindres sans augmenter leur diamètre au risque de déformer de manière permanente le laminoir. La réponse est donnée par l'analyse du schéma d'un train de laminage.

7°) Dans toutes les opérations de corroyage, forgeage, laminage, etc., on cherche à diminuer la pression maximale de formage qui s'exprime par :

$$\text{blooming } p_m = \sigma_e(1 + \mu \frac{l}{d}) \quad \text{laminage } p_m = \sigma_e(1 + \mu \sqrt{\frac{2r}{d}} \sqrt{\frac{e}{d}})$$

On peut donc agir sur les 3 paramètres σ_e , μ et $\frac{l}{d}$. La réduction de σ_e correspond au forgeage ou au laminage à chaud. En laminage à froid, ce paramètre n'est pas modifiable. On cherche donc à réduire le coefficient de frottement μ et le rapport $\frac{l}{d} = \sqrt{\frac{2r}{d}} \sqrt{\frac{e}{d}}$. La réduction du coefficient de frottement μ s'obtient par la finition des surfaces des cylindres et par la lubrification. Quant à la réduction du rapport $\frac{l}{d}$, elle passe d'une part par la réduction du rapport $\frac{e}{d}$ qui se traduit par le fait que le laminage s'effectue en plusieurs passes, la réduction d'épaisseur étant obtenue progressivement par passages successifs dans des cages d'entrefer décroissant d'où la notion de train de laminoir, d'autre part par la réduction du rapport $\frac{2r}{d}$ qui se traduit par l'utilisation de cylindres de travail de petit diamètre. Cependant ces cylindres subissent alors une déformation de flexion intense caractérisée par leur flèche δ pouvant aller jusqu'à déformation plastique permanente incompatible avec la tolérance d'épaisseur admise dans la fabrication de produits plats. La réduction de δ passe donc par la mise en place de cylindres de soutien capable de contenir la déformation de flexion des cylindres de travail.

Dans le cas de la production de rouleaux d'aluminium ménager, chaque cylindre de travail de rayon 3 mm est soutenu par une série de 9 cylindres de soutien de diamètre croissant superposés.