

Pièces de mécanique : emmanchement par rétrécissement à l'azote liquide

par Ross M. Hall*

Lorsqu'un mécanicien souhaite assembler des pièces jointives, comme une roue et un arbre, avec un ajustage forcé, il a le choix entre trois méthodes. Ces méthodes consistent à : 1 - chauffer la pièce extérieure, provoquant la dilatation temporaire du trou ; 2 - forcer les deux pièces l'une sur l'autre ; 3 - refroidir suffisamment la pièce intérieure pour la faire se rétrécir provisoirement.

S'il choisit l'emmanchement par rétrécissement, il peut utiliser un liquide cryogénique comme l'azote liquide pour produire facilement l'effet de contraction. L'azote liquide est incolore, inodore et inerte et bout à $-195,8^{\circ}\text{C}$ à la pression atmosphérique. C'est cette dernière propriété qui, en mécanique, rend son emploi éminemment approprié à la méthode de l'emmanchement par rétrécissement.

Critère technique

Dans l'étude d'un ajustage forcé, le critère technique est ou bien la charge axiale que le joint doit supporter, ou bien le couple que le joint doit transmettre.

Sur la fig. 2, la force F requise pour séparer par poussée la pièce intérieure de la pièce extérieure, est $F = \pi D L P f$ (1) où f est le coefficient de friction entre la pièce intérieure et la pièce extérieure et P est la pression développée entre les deux pièces. De même, le couple U peut être déterminé comme suit :

$$U = 1/2 DF = 1/2 \pi D^2 L P f \quad (2)$$

P dépend de l'interférence I entre les pièces et des constantes élastiques des métaux dont elles sont faites, le rapport étant :

$$P = \frac{I}{D \left[\frac{1}{M_i} \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} - P_i \right) + \frac{1}{M_o} \left(\frac{H^2 + h^2}{H^2 - h^2} + P_o \right) \right]} \quad (3)$$

où M_i , M_o , sont les modules élastiques et P_i , P_o représentent le rapport de Poisson pour la pièce intérieure et la pièce extérieure respectivement.

En posant :

$$W = \frac{2D^2}{D^2 - d^2} \quad \text{où } D = \begin{matrix} \text{le diamètre extérieur} \\ \text{de la} \\ \text{pièce intérieure} \end{matrix}$$

$$X = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} \quad \begin{matrix} \text{le diamètre intérieur} \\ d = \text{de la} \\ \text{pièce intérieure} \end{matrix}$$

$$Y = \frac{H^2 + h^2}{H^2 - h^2} \quad \begin{matrix} \text{le diamètre extérieur} \\ H = \text{de la} \\ \text{pièce extérieure} \end{matrix}$$

$$Z = \frac{2h^2}{H^2 - h^2} \quad \begin{matrix} \text{le diamètre intérieur} \\ h = \text{de la} \\ \text{pièce extérieure} \end{matrix}$$

et en transposant l'équation 3, nous obtenons :

$$I = PD \left[\frac{1}{M_i} (X - P_i) + \frac{1}{M_o} (Y + P_o) \right]$$

Si la pièce intérieure et la pièce extérieure sont du même métal (ou en métaux ayant les mêmes constantes élastiques, de sorte que $M_i = M_o = M$ et $P_i = P_o = P$) le rapport se simplifie pour donner :

$$I = \frac{PD}{M} (X + Y)$$

On peut également noter que lorsque d est nul (arbre monobloc) ou très petit par rapport à D , on obtient $W = 2$, $X = 1$. De même, quand H est beaucoup plus grand que h , $Y = 1$, $Z = 2$.

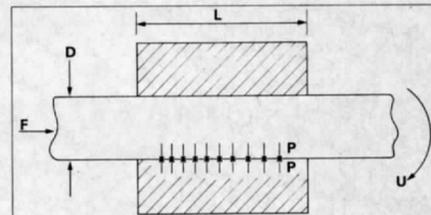


Fig. 2. Les critères techniques.

Pour les opérations individuelles d'emmanchement par rétrécissement, il ne se pose pas de problème dans l'application des calculs précédents, car les diamètres du trou et de l'arbre peuvent être mesurés au micromètre et la valeur précise de l'interférence peut être déterminée. Toutefois, dans le cas des pièces produites en grande série par emmanchement par rétrécissement, la mesure et l'appariement des couples arbres/trou n'est pas possible et il faut établir par des calculs les tolérances extrêmes admises pour les pièces.

Le couple constitué par le plus grand trou et le plus petit arbre offrirait un jeu amplement suffisant pour l'assemblage, mais il est essentiel de s'assurer qu'il y ait suffisamment d'interférence pour obtenir l'étroitesse d'emmanchement requise. Inversement, il faut s'assurer que le couple constitué par le plus petit trou et le plus gros arbre offre assez de jeu pour permettre l'assemblage par la méthode envisagée et qu'il ne présente pas une interférence excessive éventuelle qui pourrait imposer des contraintes excessives au métal.

Rétrécissement avec l'azote liquide

Une fois que l'interférence requise pour une application donnée a été déterminée, le technicien doit pouvoir évaluer l'ampleur du rétrécissement possible lorsque la pièce intérieure est refroidie à l'azote liquide. On obtient cette valeur par la formule $C(T_1 - T_2)$, où C = coefficient moyen de contraction, T_1 = température ambiante, T_2 = température de l'azote liquide.

La différence entre le rétrécissement total que l'on peut obtenir par le refroidissement à l'azote liquide et le jeu nécessaire pour un assemblage facile, donne l'interférence maximale disponible pour l'assemblage à la température normale. Cette interférence maximale disponible

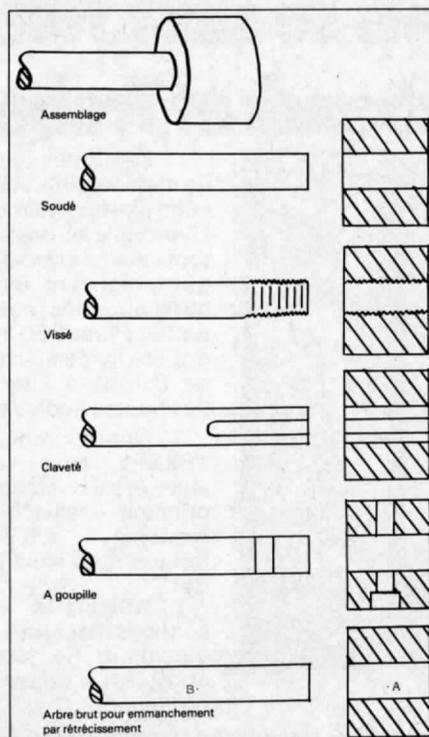


Fig. 1. Diverses méthodes d'assemblage de l'arbre et de la roue pour produire l'ensemble fini.

* Ingénieur des études de traitement, The British Oxygen Co. Ltd.

Pièces de mécanique

peut, évidemment, n'être pas requise pour assurer l'étroitesse d'ajustage voulue, particulièrement sur les pièces de grands diamètres.

Quantité d'azote requise

La quantité d'azote requise pour effectuer une opération d'emmanchement par rétrécissement se divise en deux parties : la quantité requise pour refroidir la pièce et, le cas échéant, son montage ou porte-pièce ; et la quantité requise pour la compensation des pertes inévitables pendant le traitement de refroidissement de la pièce.

On peut calculer la quantité d'azote requise pour refroidir la pièce d'après la formule :

$$j = (T_1 - T_2) ws \quad (4)$$

où s = chaleur spécifique moyenne
 T_1 = température ambiante
 T_2 = température de l'azote liquide et
 w = poids du métal à refroidir.

Si la pièce (plus le montage, etc.) est refroidie par immersion dans un bain non couvert, la quantité d'azote liquide avec chaleur latente de vaporisation E requise par unité de poids de la pièce (plus montage, etc.) est :

$$Q = \frac{(T_1 - T_2) ws}{E}$$

La substitution des valeurs appropriées dans l'équation 5 donne les quantités d'azote liquide requises pour refroidir le poids unitaire de ces métaux.

Le temps nécessaire au refroidissement des pièces est indiqué sur la fig. 3, où la coupe transversale du métal constitue le facteur de base. Ainsi, pour parvenir aux temps nécessaires pour le refroidissement des pièces creuses, il convient d'utiliser comme base l'épaisseur de la paroi et non le diamètre total.

Contraintes et effets métallurgiques

Pendant le refroidissement d'une pièce à sertir par emmanchement, la température de la zone extérieure est plus basse que celle du noyau. Il en résulte un gradient de température imposant au métal des contraintes considérables. On ne peut attribuer aucune valeur très significative à ces contraintes, car elles varient suivant le profil de la température, qui change pendant toute la durée du traitement de

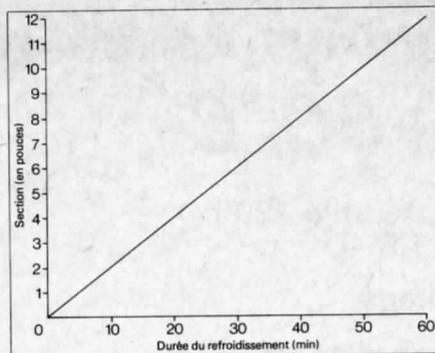


Fig. 3. Temps de refroidissement de pièces de coupe transversale donnée.

refroidissement. Toutefois, après refroidissement uniforme du métal dans toute son épaisseur, les contraintes disparaissent.

Bien que la manifestation de contraintes pendant le refroidissement à l'azote liquide doive être reconnue, on observe dans la très grande majorité des cas que ces contraintes sont non seulement transitoires et sans effet permanent, mais encore plus petites que les contraintes imposées par le réchauffement du métal dans le montage par dilatation.

Dans les cas de l'aluminium, du cuivre et des alliages du cuivre (laiton, bronze et Monel, par exemple), aucune transformation métallurgique significative ne suit leur soumission à la température de l'azote liquide. Toutefois, avec les aciers (qui intéressent la majorité des montages par rétrécissement), il peut se produire (mais pas nécessairement), deux types de changements métallurgiques.

Une modification, qui ne se produit que sur les aciers ordinaires au carbone ou les aciers à faible teneur en alliage, et seulement lorsque le métal est froid, se traduit par une perte marquée de résistance au choc. La résistance au choc initiale est rétablie lorsque le métal revient à la température ambiante. Du fait de cette fragilité provisoire, il est important de ne pas soumettre la pièce sertie froide à des coups violents, ni à des efforts soudains.

Une autre modification, dans ce cas permanente, peut se produire dans les aciers ordinaires ou alliés avec une teneur austénitique résiduelle. Elle se manifeste par la transformation d'une partie ou de la totalité de la structure austénitique en forme martensitique. De cet effet peut résulter, dans une certaine mesure, un durcissement permanent de l'acier. Les changements effectifs, s'il y en a, dans la dureté des pièces en acier refroidies à la température de l'azote liquide, dépendent du type d'acier, de la teneur austénitique,

de la durée de l'exposition à la basse température et probablement aussi d'autres facteurs. Ils ne peuvent donc pas être déterminés pour couvrir tous les cas. Dans la majorité des cas, ces changements relativement faibles n'ont pas d'importance.

Les forces de traction et de compression établies dans la pièce intérieure et la pièce extérieure d'un ensemble emmanché par rétrécissement ne doivent pas excéder les contraintes de tension des métaux des pièces. Si ces contraintes sont dépassées, le métal peut être amené à l'état plastique et constituer une source de faiblesse dans la structure assemblée ; ou, dans les cas extrêmes, la résistance optimum à la traction peut être dépassée et il peut en résulter la fracture de la pièce extérieure.

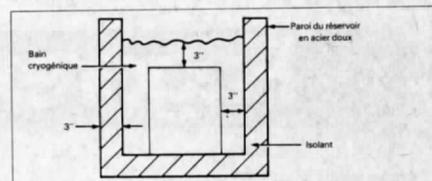


Fig. 4. Bain typique pour montage par rétrécissement à l'azote liquide.

Matériel nécessaire

Deux dispositifs fondamentaux sont nécessaires pour l'assemblage par rétrécissement à l'azote liquide. L'un est un réservoir de magasinage pour les approvisionnements en liquide cryogénique, que l'on doit maintenir pendant de longues périodes avec une perte minimale, et l'autre est le bac pour le bain des pièces à refroidir. Le type de ce dernier varie selon qu'il est destiné à une chaîne de production régulière, à la production d'ensembles uniques, ou encore selon les dimensions des pièces.

Le matériel et les méthodes pour l'emmanchement par rétrécissement utilisés pour une production régulière varient évidemment largement. Il est donc impossible de les décrire autrement que pour les cas typiques.

Dans la plupart des applications d'emmanchement par rétrécissement sur chaîne de production, les pièces sont insérées dans les bains d'azote liquide et en sont extraites soit manuellement (pour les petites pièces), soit avec assistance mécanique (pour les grosses pièces). Généralement, le bain est isolé plus efficacement que pour les ensembles uniques. Il est contenu dans un bac en métal (un acier allié ou de l'aluminium) moins cassant que l'acier ordinaire à basse tem-

Pièces de mécanique

pérature. De même, dans le travail sur la chaîne de production, les moyens de retenue et de positionnement des pièces contractées et refroidies sont souvent plus complexes que pour les ensembles uniques.

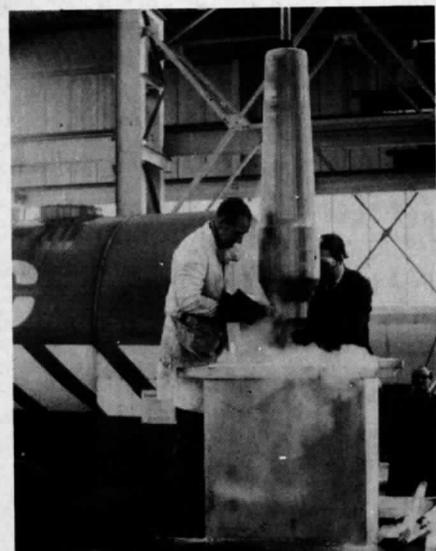


Fig. 5. Arbre pour machine à concasser les minerais prêt pour l'assemblage.

Pour des petites pièces comme guides et sièges de soupapes de moteurs d'automobiles et autres pièces de voitures, les moteurs de petite puissance, les arbres des petites pompes, etc., au cas où ces pièces sont plongées et extraites du bain manuellement, il existe une gamme de bacs commerciaux. Ils sont constitués par des réservoirs cylindriques non couverts en acier inoxydable, disponibles en de nombreuses dimensions. Pour les pièces de plus grande taille, il est généralement nécessaire de construire un bac spécial à azote liquide, en fonction des caractéristiques du travail à exécuter.

Les bacs doivent être réalisés en un métal qui ne se fragilise pas à la température de l'azote liquide (par exemple, l'acier inoxydable, l'acier à 9% de Ni, l'aluminium, le cuivre ou un alliage de cuivre), avec une résistance théorique appropriée pour supporter le poids des pièces, si celles-ci doivent reposer au fond du bac. L'isolation doit être assurée soit entièrement par une matière inorganique ininflammable, telle que la laine de verre ou la laine de scorie, soit par une telle matière pour les premiers 25 mm d'épaisseur en contact avec la paroi du bac métallique, la couche extérieure étant seule constituée par une matière isolante telle que la mousse de matière synthétique, si on le souhaite. La matière

isolante doit être enfermée et protégée par une enveloppe extérieure, métallique de préférence.

L'épaisseur de la matière isolante sera généralement de l'ordre de 75 à 150 mm, selon les dimensions du bac, la nature de la matière isolante et d'autres facteurs encore.

Lorsqu'un seul ensemble (ou un petit nombre d'ensembles) doit être emmanché par rétrécissement, on fabrique un matériel de refroidissement aussi simple et aussi bon marché que possible pour des raisons d'économies. Les opérations uniques sont requises généralement à l'occasion de travaux de réparation, ou pour la construction de matériel mécanique très spécialisé ou de prototypes.

Un bac simple, soit un tambour ou un récipient d'acier doit, de préférence, être isolé et reposer sur un fond de sable contenu dans un récipient plus grand en métal ou en bois, ou être enfoncé dans un sol de terre battue. L'isolation n'a pas besoin d'être très efficace parce que le bac ne doit contenir l'azote liquide que pour une courte durée — d'ordinaire, environ une heure. Le fond de sable est une sécurité pour le cas où le bac se fissurerait accidentellement (la tôle d'acier devient très fragile à la température cryogénique et peut être fracturée si on y laisse tomber une pièce lourde).

Le bac doit être assez profond pour permettre l'immersion totale des pièces et assez large pour pouvoir les accepter et laisser quelques centimètres entre chaque pièce et la paroi du bac. Les petites pièces peuvent être immergées manuellement, tenues par des pinces, par des câbles ou par un montage de support spécial selon ce qui convient le mieux.

La méthode pour une pièce lourde de grandes dimensions consiste généralement à la poser où à la suspendre dans le bac vide et à y faire couler l'azote liquide à partir d'un tuyau réglé de façon à inonder la pièce. Comme il faut que la pièce complète soit trempée uniformément, il peut être parfois préférable d'emplir le bac avant d'immerger la pièce, comme dans le cas des petites pièces. On peut constater l'achèvement du refroidissement lorsqu'on observe la fin de l'ébullition vigoureuse de l'azote liquide et le début d'un frémissement tranquille.

Les avantages du procédé

La technique de l'emmanchement par rétrécissement offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes plus courantes

de dilatation par la chaleur et d'emmanchement forcé. Ces avantages sont les suivants :

1 — Il n'y a pas de déformation des pièces. Cela signifie que les pièces assemblées n'exigent pas d'usinage de finition subséquent. Les engrenages soumis au traitement thermique et les pièces de cette nature ne sont pas affectées par le traitement d'emmanchement par rétrécissement.



Fig. 6. Assemblage d'un axe de palier de croisillon.

2 — La méthode est rapide par rapport aux méthodes de dilatation par la chaleur et de montage forcé. Un exemple réel : au lieu des 24 heures nécessaires pour chauffer une pièce coulée, suivies de 24 heures pour son refroidissement après le montage des bagues, le temps total d'assemblage a été réduit à 30 minutes par la méthode du rétrécissement. Dans un autre cas, on insérait des axes en acier par une opération manuelle de montage forcé, au rythme de 50 par jour. En refroidissant les 50 axes dans un bain d'azote liquide, on a réduit le temps d'assemblage à 30 minutes.

3 — La méthode est propre et ne produit pas d'encrassement comme dans le cas de la dilatation par la chaleur — il n'y a ni oxydation, ni « bleuissement » des aciers dans des bains d'huile, ni dépôts de carbone, ni pollution de l'atmosphère par des vapeurs émanant de bains d'huile ouverts.

4 — On peut obtenir la résistance de joint requise avec un degré d'interférence calculé. En revanche, le montage forcé, du fait de la déformation qui en résulte, nécessite une interférence excessive si l'on veut obtenir la résistance de joint requise. □