Ingénierie optimale de couteaux industriels : choix du matériau

21 mai 2021, 02:00

Divers éléments influent sur le fonctionnement et la durée de vie des couteaux industriels. Dans une série d'articles, nous nous penchons sur les dernières connaissances dans ce domaine, afin d'aboutir à des solutions meilleures et durables. Le premier thème, et le plus important, est le choix des matériaux pour les couteaux.

Importance et potentiel de l'ingénierie de couteaux

Dans de nombreuses applications de l'industrie technologique, divers matériaux sont découpés sur mesure. Lors de la découpe de certains matériaux, on constate souvent des problèmes qui peuvent réduire la durée de vie des couteaux industriels utilisés. Dans le cadre du projet COOCK QualiKnife, Sirris entend recenser ces problèmes et trouver des solutions durables avec les entreprises.

Dans cette quête de solutions, on relève trois sujets importants qui déterminent en grande partie le fonctionnement et la durée de vie des couteaux : le choix du matériau des couteaux, le traitement thermique associé et le traitement de surface des couteaux. De nombreuses propriétés sont bien entendu liées. Tous les aspects doivent donc être pris en compte pour parvenir à un couteau optimal. C'est la raison pour laquelle quelques articles vont aborder brièvement les dernières connaissances sur ces trois thèmes, en commençant par le substrat : quel matériau convient pour être utilisé comme couteau industriel ?

Dans la plupart des cas, ce substrat se compose d'acier. Il en existe plusieurs sous-groupes, chacun ayant ses propres propriétés. Dans ce premier article, nous allons examiner de plus près les différents types d'acier qui peuvent être envisagés pour les couteaux, y compris sur le plan du coût.

Aciers pour couteaux

Comme il existe de nombreux types d'acier, le choix solidement étayé d'un matériau est souvent malaisé. En fait, il n'existe pas de véritable « acier pour couteau ». Pour cette application, on parle plutôt d'acier à outils ou d'acier pour travail à froid. Le choix de l'acier repose sur une combinaison de propriétés techniques (dureté, trempabilité, ductilité, résistance à la corrosion et à l'usure requises, etc.) et de propriétés non techniques (prix de revient, possibilité de livraison, etc.).

La classification dont nous parlons ci-dessous est basée sur la composition chimique. Celle-ci détermine en effet de nombreuses propriétés techniques telles que la dureté et la trempabilité,

mais elle est également importante pour le coût (p. ex. en raison de la présence d'éléments coûteux tels que le chrome, le nickel ou le molybdène).

Acier au carbone

Comprenant principalement du carbone (C, généralement supérieur à 0,5%) comme composant d'alliage, ces aciers contiennent également de petites quantités de silicium (Si), utilisé pour la désoxydation, et de manganèse. Le manganèse (Mn) est un élément qui non seulement influe sur la résistance et la trempabilité, mais permet également la formation de sulfures de manganèse (MnS). Pour la fabrication de couteaux, seuls certains aciers à teneur en carbone relativement élevée conviennent. Le tableau ci-dessous présente quelques types avec leur composition, ainsi que leurs désignations AISI et DIN.

AISI	**DIN**	**C (%)**	**Mn (%)**	**Si (%)**
1050	C50	0,5	0,75	< 0,25
1060	C60	0,6	0,75	< 0,25
1075	C75	0,75	0,55	< 0,25
1095	C92D	0,95	0,40	< 0,25
W1	C105	1,0	0,25	< 0,25

Tableau 1 : Quelques aciers au carbone pour la fabrication de couteaux

À partir d'environ 0,8% C, l'acier (voir le diagramme Fe-C) contiendra également plus de cémentite (Fe_3C, carbure de fer). Il s'agit d'une phase dure, qui garantit une certaine résistance à l'usure. La dureté des carbures sera abordée plus tard, après la discussion sur les aciers fortement alliés pour travail à froid.

Aciers pour outils faiblement alliés

Ce groupe d'aciers, comme son nom l'indique, contient plus d'éléments d'alliage que les aciers au carbone ordinaires. La limite n'est pas très clairement définie. En règle générale, on se base sur la somme des éléments hors C, Mn et Si inférieure à 5%. Ce groupe d'aciers, comme les aciers au carbone, présente une résistance limitée à l'usure en raison de la présence relativement limitée et de la dureté de la cémentite. Seuls les aciers au chrome (Cr), au molybdène (Mo) et au vanadium (V) présentent de petites fractions de carbures spéciaux, de sorte que leur résistance à l'usure sera légèrement supérieure. Le tableau ci-dessous présente quelques aciers pour outils avec un %C croissant.

Acier	%C	%Mn	%Si	%Cr	%V	%
50CrV4	0.5	0.95	0.25	1.0	0.15	
55Si7	0.55	0.75	1.8			
80CrV2	0.8	0.5	0.3	0.5		
105Cr4	1.0	0.3	0.3	1.5		
142WV13	1.42	0.25	0.15	0.4	0.4	2.

Tableau 2 : Quelques aciers faiblement alliés pour la fabrication de couteaux

Notez que l'acier 105Cr4 fait également partie des **aciers pour roulements à billes**. En raison de leur %C élevé, ces aciers se trempent aisément et atteignent des duretés élevées. Cependant, il faut tenir compte du fait que le %C a un effet négatif sur la ductilité. Plus il y a de carbone, plus il peut se former de cémentite ou d'autres carbures qui réduisent la ductilité.

Les aciers faiblement alliés « **résistants à l'usure** » peuvent également être considérés comme faisant partie de ce groupe. Il s'agit d'aciers ayant une teneur en carbone relativement faible et auxquels on a ajouté de petites quantités d'éléments d'alliage tels que Cr, Mo et V. À titre d'exemple, citons les aciers Creusabro et Hardox (voir tableau). Ils sont donc largement utilisés dans les machines qui effectuent des excavations. L'avantage de ces aciers est qu'ils sont relativement peu coûteux et que, grâce à leur dureté modérée (à la livraison), ils présentent une bonne ductilité et une bonne résistance à l'usure. En outre, certains sont soudables par leur faible teneur en éléments. Pendant le soudage, une quantité trop importante d'éléments d'alliage donnerait en effet lieu à des zones durcies et à des fissures à froid. Un alliage particulier de ce groupe est le Creusabro 8000, qui présente une caractéristique spéciale : l'effet TRIP (« TRansformation Induced Plasticity »). En bref, lors de la déformation à froid (déformation plastique), la présence d'austénite résiduelle confère à l'acier un renforcement accru en plus de sa dureté existante.

Un troisième sous-groupe d'aciers est celui des **aciers alliés au bore (B)**. Contrairement à d'autres éléments, le bore en très petites quantités (p. ex. 10 ppm ou 0,001%) a une influence significative sur la trempabilité de l'acier. La dureté, comme pour tous les aciers, est déterminée par le %C (voir figure 1) tandis que la capacité à durcir à cœur est déterminée par les éléments d'alliage présents.

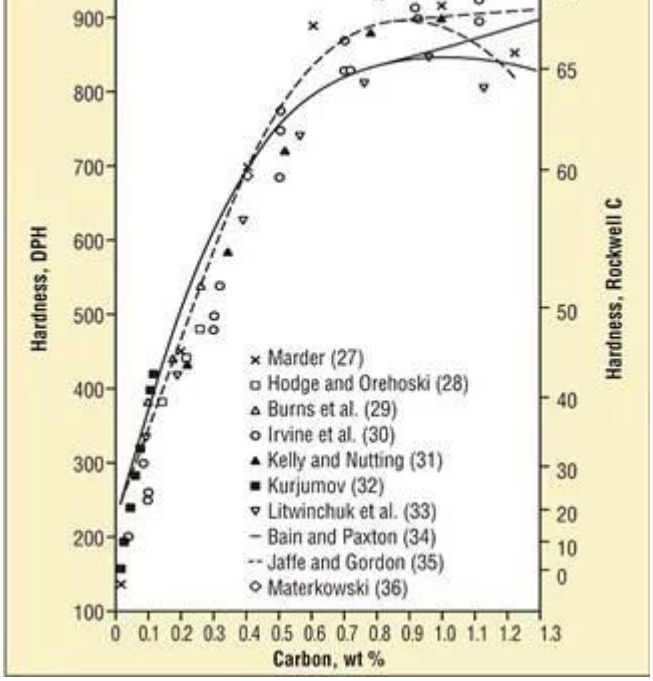


Figure 1 : Dureté de l'acier en fonction du %C

Un autre avantage de ces aciers est leur coût relativement faible, puisque l'élément bore n'appartient pas aux éléments d'alliage coûteux, tels que Cr, Mo, V et W (tungstène).

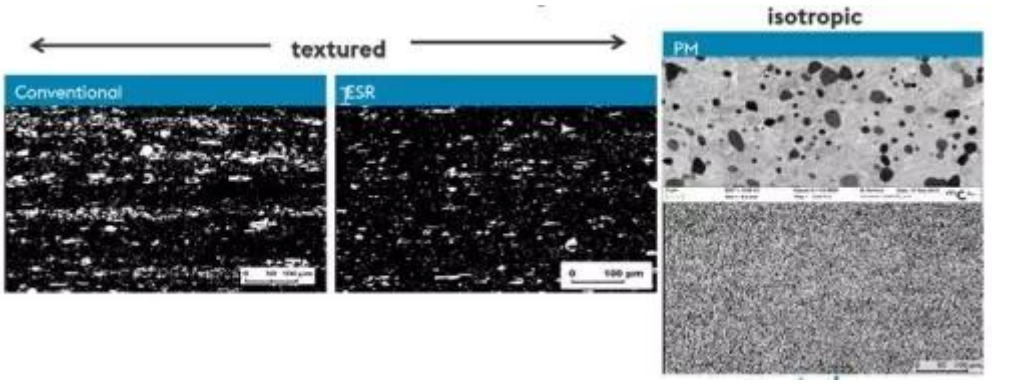
Acier	**Dureté HB**	**%C**	**%Mn**	**%Cr**	**%Mo**	**%Ni**	**%B**
Hardox 400	400	0,15	1,6	0,3	0,25	0,25	
Hardox 500	500	0,27	1,6	1	0,25	0,25	
Hardox 600	600	0,45	1,0	1,2	0,8	2,5	
Creusabro 6000	600	0,32	0,85	0,5	0,15	0,35	
Creusabro 8000	> 600	0,25	1,5	1,5	0,5	0,4	
Boron 33	565	0,33	1,3	0,25			0,0008-0
Boron 38	590	0,38	1,3	0,25			0,0008-0

Boron 42	610	0,42	0,8	0,60			0,0008-0

Tableau 3 : Quelques aciers faiblement alliés résistants à l'usure pour la fabrication de couteaux

Aciers pour travail à froid fortement alliés

Ce terme indique qu'il s'agit d'aciers destinés à la déformation à froid (poinçonnage, découpage, formage) par opposition aux aciers pour travail à chaud, qui sont plus adaptés aux opérations à haute température telles que le forgeage, l'extrusion, etc. Groupe d'aciers important, les aciers pour travail à froid possèdent parfois des compositions complexes. On distingue trois sous-groupes : les aciers coulés conventionnellement (lingots), les aciers refondus (Electro-Slag-Refining ou ESR) et les aciers métallurgiques en poudre (PM). La différence réside dans les méthodes de production. Dans l'acier en lingots, l'acier liquide est coulé en blocs ou en coulée continue et est directement transformé par laminage ou forgeage en formes plus petites. Pour les aciers ESR, un traitement métallurgique en poche est effectué avant la coulée pour améliorer la pureté.



(Cliquez pour agrandir)
Figure 2 :Différence structurelle dans la distribution des carbures entre les aciers conventionnels, ESR et PM

Les propriétés (notamment la ductilité) sont ainsi meilleures que celles de l'acier en lingots. Les aciers PM, en revanche, ne sont pas coulés mais compactés, à partir de gouttelettes d'acier finement atomisées. Il en résulte une grande pureté, mais aussi une structure de solidification non dirigée, contrairement à l'acier moulé classique. C'est ce qu'on appelle « acier isotrope » : ses propriétés mécaniques sont les mêmes dans toutes les directions. Il est clair que ces aciers possèdent les meilleures propriétés, notamment en termes de ductilité, mais ils sont aussi plus chers à l'achat.



Figure 3: Production schématique d'aciers en lingots, PM et ESR

Le tableau ci-dessous donne une liste courte, mais incomplète, d'aciers proposés par différents fabricants tels que Böhler, Uddeholm et Carpenter, ainsi que leur composition.

Acier	**Processus**	**%C**	**%Cr**	**%Mo**	**%V**	**%W**	**%Co**
A8	Lingot	0,55	5,0	1,25			
A8 Mod	Lingot	0,5	8,0	1,3	0,5		
Unimax	ESR	0.5	5.0	2.3	0.5		
Caldie	ESR	0,7	5,0	2,3	0,5		
Sleipner	Lingot	0.9	7.8	2.5	0.5		
CPM3V	PM	0,8	7,5	1,3	2,7		

D2/1.2379	Lingot	1,5	12,0	1.0	1.0		
Vanadis 4E	PM	1.4	4.7	3.5	3.7		
Vanadis 6	PM	2.1	6.8	1.5	5.4		
Vanadis 8	PM	2,3	4,8	3,6	8.0		
K390	PM	2.5	4.2	3.8	9.0	1.0	2.0

Tableau 4 : Quelques aciers fortement alliés importants pour les couteaux

Notez que certains échantillons contiennent du Cr, du Mo et du V, ainsi que du W et du Co (cobalt). On peut affirmer que la résistance à l'usure est largement déterminée par la présence de carbures de vanadium (VC). Ceux-ci donnent en effet la dureté la plus élevée, suivis par le WC (carbure de tungstène) et le Cr_xC_y (voir tableau 6). L'élément cobalt (Co) influence principalement la résistance au revenu et à l'oxydation à haute température (« hot hardness »). C'est la raison pour laquelle cet élément se retrouve généralement avec le tungstène (W) dans le groupe suivant, les **aciers rapides** (HSS en abrégé). Bien que l'application pour les couteaux soit plutôt limitée, ces aciers ont également des applications en dehors des outils, par exemple les ciseaux et les forets, car leurs propriétés (dureté, résistance à l'usure) sont très élevées. Le tableau 5 donne une vue d'ensemble des types de RSS les plus courants.

Acier	**Processus**	**%C**	**%Cr**	**%Mo**	**%V**	**%W**	**%Co**
M2/HS6-5-2	Lingot	0.85	4.0	5.0	2.0	6.0	
M3:2	Lingot/PM	1.2	4.0	5.0	3.0	6.0	
M3	PM	1.0	4.2	5.8	2.5	6.2	
S290	PM	2.0	3.7	2.5	5	14.5	11
S390	PM	1.64	4.8	2	4.8	10.4	8
Vanadis 23	PM	1.28	4.2	5	3.1	6.4	

Vanadis 60	PM	2.3	4.25	7	6.5	6.5	10.5

Tableau 5 : Quelques aciers rapides importants pour la fabrication de couteaux

Aciers inoxydables durcissables

Jusqu'à présent, nous avons principalement considéré l'aspect de la dureté, de la trempabilité et de la résistance à l'usure lors du choix de l'acier pour couteaux. Pour certaines applications, comme les couteaux dans l'industrie alimentaire, la résistance à la corrosion est très importante. L'élément Cr joue un rôle important dans ce contexte. Cependant, la résistance à la corrosion est également déterminée par d'autres éléments, tels que Ni, Mo et N. Le *pitting resistance number* (PREN, indice de résistance à la piqûre) est fonction de la composition, plus précisément de la somme %Cr + 3,3%Mo+16%N. La plupart des aciers résistants à la corrosion doivent également être trempés pour présenter une résistance élevée à l'usure. Les aciers inoxydables classiques, tels que 304 et 316, contiennent suffisamment de Cr (plus de 12%) et de Ni pour être inoxydables (mais pas antirouille), mais ont trop peu de carbone pour être durcissables. Par conséquent, leur structure à la trempe est austénitique (matrice KVC, phase gamma, non magnétique). Les types durcissables contiennent plus de 0,2% de C, en plus de Cr, Mo et V. Le nickel n'est pas ajouté, car cet élément favorise la phase austénitique. Les types trempables sont ferritiques (matrice KRC, phase alpha avec carbures, magnétique) à la livraison et peuvent être trempés comme les autres aciers au carbone. À l'état trempé, ces aciers ont alors une structure martensitique (matrice TRC, phase alpha', magnétique) avec une dureté relativement élevée (en fonction du %C).

Acier	**Processus**	**%C**	**%Cr**	**%Mo**	**%V**	**%W**	**%Co**
420	Lingot	0,45	13				
440A	Lingot	0,7	17	0,5			
440B	Lingot	0,85	17	0,5			
440C	Lingot	1.05	17				
N690	Lingot	1,07	17,3	1,1	0,1		1,5
Elmax	PM	1,7	18	1	3		
Vanax	PM	0,36	18,2	1,1	3,5		

M398	PM	2,7	20	1	7,2	0,7	

Tableau 6 : Quelques aciers durcissables résistants à la corrosion pour les couteaux

Certains aciers peuvent contenir de l'azote (N) en plus du C. Cet élément est parfois ajouté parce que le carbone a tendance à se lier au Cr pour former des carbures de chrome. Lorsque la teneur en chrome est localement inférieure à 12%, la résistance à la corrosion diminue et une corrosion intergranulaire se produit. L'azote prendra le rôle du carbone en tant qu'élément stabilisateur ferritique et fixera moins le chrome présent, améliorant ainsi la résistance à la corrosion. Dans une section suivante, nous expliquons l'influence des carbures sur la résistance à l'usure.

Les carbures dans l'acier pour couteaux

Comme mentionné ci-dessus, les carbures sont des phases majeures de l'acier pour les applications de travail à froid. On peut à cet égard faire une comparaison avec le béton. Dans le béton, les cailloux forment la phase dure et résistante à l'usure dans le ciment mou, qui fait office de matrice. Dans l'acier, les carbures forment la phase dure dans une matrice plus tendre (mais également dure), constituée de martensite. Dans le tableau 6 ci-dessous, nous indiquons quels carbures peuvent être formés dans l'acier, ainsi que leur dureté. Le tableau 7 suivant indique combien de carbures peuvent être présents dans les aciers alliés au chrome sous forme de cémentite (Fe_3C) et de carbures de chrome (Cr_7C_3).

Carbure	**Composition**	**Dureté (Vickers)**	**Dureté (HRC)**
Cémentite	Fe_3C	1000	69
Carbure de chrome	$Cr_{23}C_6$	1200	72
Molybdène/Tungstène	Cr_6C/W6C	1400	75
Carbure de chrome	Cr_7C_3	1500	76
Carbure de vanadium-chrome	$(CrV)_7C_3$	1950	81
Carbure de tungstène	WC	2600	86
Carbure de vanadium	VC	2800	87

Tableau 7 : Vue d’ensemble des carbures présents dans les aciers alliés pour travail à froid

Ceci la montre que les valeurs les plus dures sont surtout produites par les carbures de tungstène et de vanadium. C’est aussi pour cette raison que le WC, entre autres, est utilisé avec les carbures cémentés.

Acier	**%C**	**%Cr**	**$Þ_3C$**	**$\%Cr_7C_3$**
52100	1.05	1.5	6	0
A2 (100CrMoV5)	1	5	0	6
440 C (X110CrMo17)	1.05	17	0	12
D2 (X155CrV12)	1.5	12	0	15

Tableau 8 : Distribution des carbures dans certains aciers alliés

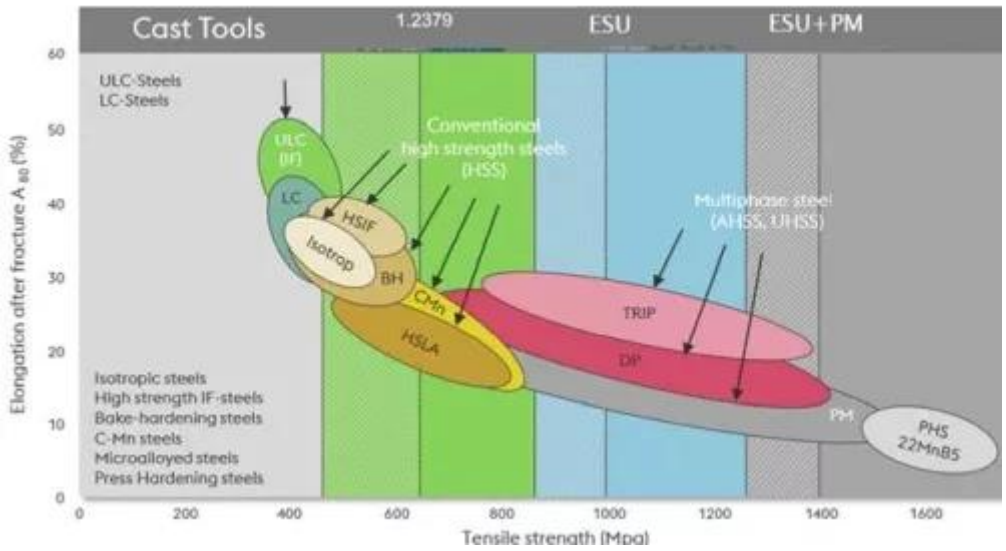
Il ressort également du tableau 7 que des « carbures mixtes » peuvent apparaître, par exemple avec du chrome et du vanadium, et que leur distribution dépend également de la « concurrence » entre les éléments présents. Le vanadium, par exemple, est un formateur de carbure plus résistant que le tungstène et le chrome.

La figure 4 montre la relation entre la résistance à l'usure (déterminée par la dureté) de certains aciers fortement alliés (représentée sur l'axe horizontal) et la ductilité (représentée sur l'axe vertical). La plupart des points se situent sur des courbes descendantes, leur emplacement mutuel étant déterminé par le mode de production (lingot, ESR, PM).



(Cliquez pour agrandir)
Figure 4 : Relation entre ductilité et résistance à l'usure des aciers fortement alliés pour travail à froid

Par ailleurs, le choix de l'acier doit également être considéré en fonction du matériau à couper. Les couteaux destinés à couper des tôles d'acier à haute résistance nécessitent parfois l'emploi d'aciers PM fortement alliés. La figure 5 montre quels types d'aciers pour travail à froid peuvent être utilisés en fonction de la résistance des qualités de tôles d'acier modernes.



(Cliquez pour agrandir)
Figure 5 : Choix du matériau de l'acier pour couteaux en fonction de la résistance de la tôle d'acier

Enfin, nous donnons les prix indicatifs des types d'acier par kilogramme. Il est clair que le coût de l'acier dépend de la quantité et du type d'éléments d'alliage qu'il contient, ainsi que de la méthode de production et de l'état à la livraison. Les aciers PM sont généralement les plus chers en raison de leur méthode de production spéciale.

Acier	**Type**	**Coût EUR/kg**
C45	Ingot	3
1.2379	Ingot	5
Caldie	ESR	15

Vanadis 4E	PM	40
K390	PM	60

Tableau 9 : Prix indicatifs des aciers pour la production de couteaux

Conclusion

Cette introduction reposant sur la composition peut déjà servir d'orientation pour le choix du matériau. Bien entendu, d'autres facteurs jouent un rôle : possibilités de livraison, disponibilité des formes (barres, plaques, tubes, ...) et usinabilité. De nombreux aciers fortement alliés contiennent des carbures primaires durs à l'état de livraison, qui nuisent à l'usinabilité. La prise en compte de tous ces facteurs permettra de poser un choix éclairé.

Le tableau 9 donne quelques exemples de choix de matériaux réussis qui ont permis d'augmenter considérablement la durée de vie et de réduire les coûts d'exploitation.

Application	**Ancien matériau - durée de vie**	**Nouveau matériau - durée de**
Couteaux pour découpe à chaud du plastique	1.2343 - 43000 coups	Unimax - 150000 coups
Recyclage de batteries automobiles	1.2379 - 2 jours	Stavax ESR - 6 semaines
Découpage de tôle d'acier DP600	1.2345 + revêtement PVD - 25000 coups	K390 - 110000 coups
Coupe de fils en acier inoxydable	1.2379 – 3600 coups	K490 - 22000 coups

Tableau 10 : Exemples de durée de vie de couteaux résultant d'un changement de matériau de base

Dans une partie suivante, nous aborderons les **traitements thermiques** susceptibles d'être appliqués à l'acier pour couteaux afin d'obtenir les propriétés requises (dureté, ductilité).

Le projet QualiKnife consacré à l'amélioration des couteaux industriels a été réalisé avec le soutien financier de VLAIO.

Sources

- Knife Engineering Steel, Heat Treatment and Geometry dr Larrin Thomas
- Brochure Uddeholm Tool Steels
- Brochure Böhler Cold Work Steel

Auteurs