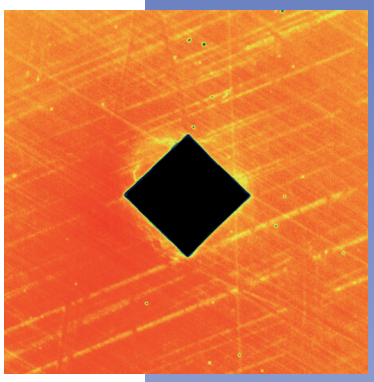
Essais de dureté et préparation d'échantillons

Struers

Application Notes

1. Introduction

Les essais de dureté représentent un outil utile pour l'évaluation des matériaux, le contrôle qualité des processus de fabrication et pour la Recherche et le Développement. Ils donnent une indication sur les propriétés d'un matériau, telles que sa robustesse, sa ductilité et sa résistance à l'usure.
Dans cette Application Notes, nous allons considérer la dureté par empreinte que l'on peut définir comme une mesure de la résistance d'un matériau à la déformation plastique, lors de la pénétration d'un pénétrateur dur dans un matériau plus tendre. Le résultat obtenu lors de l'essai va dépendre de la méthode d'essai utilisée, c'est-à-dire de la charge et de la durée, du type de pénétrateur (géométrie/matériau) et de l'application de la méthode d'essai. L'essai de dureté utilisé dépend du type de matériau, de la dimension de la pièce et de son état. Donc, la méthode utilisée devrait toujours être indiquée avec le résultat obtenu. Il existe différents standards disponibles qui, si correctement suivis, peuvent assurer un résultat fiable. Toutes déviations des valeurs standards, par exemple la durée de l'essai, devront être notées dans le rapport de dureté. Lors des essais de dureté, il est important de garder sous contrôle les paramètres influençant l'essai afin de garantir la précision et la répétabilité.



Pour les métaux, les essais de dureté par empreinte sont utilisés. Les essais les plus communs dans cette catégorie sont les essais Rockwell, Vickers, Brinell et Knoop. Pour les essais Rockwell, la profondeur de pénétration sert à mesurer la dureté, alors que pour les essais Vickers, Brinell et Knoop, c'est la mesure optique de la dimension de l'empreinte qui est utilisée. Différentes normes sont disponibles pour tous les types d'essais, dans lesquels la procédure/les exigences de l'essai de dureté en question sont expliquées.

Les mesures de dureté peuvent fournir des informations au sujet du matériau, pour le contrôle qualité général du matériau après son usinage ou après traitement thermique. Les essais de dureté sont utilisés pour tester la trempabilité de l'acier, par l'essai Jominy, la profondeur de pénétration d'un acier trempé et aussi pour contrôler la performance des soudures. Il existe également un rapport entre la dureté et la limite apparente d'élasticité/charge de traction ultime, et l'essai de dureté peut donner une estimation qualifiée des propriétés mécaniques [1, 2]. Une autre application possible est pour les céramiques/cermets/carbures frittés, etc. où la ténacité à la rupture (KIC) peut être déterminée par un essai de dureté Vickers avec un rapport basé sur la formule de Palmqvist [3].

D'autres catégories d'essai de dureté sont:

- Un essai dynamique des métaux est l'essai de dureté Shore (essai de dureté par rebondissement), où la hauteur du rebondissement d'un marteau est utilisée comme mesure de la dureté.
- Pour les minéraux, un essai scléométrique (essai de rayage) au cours duquel un minéral plus dur raye un autre matériau plus tendre.

Machine d'essai automatique DuraVista-40

- Pour les essais de dureté par pénétration instrumentés (IIT), la dureté et le module d'élasticité peuvent être déterminés avec précision.
  Lors de la charge et de la décharge, la courbe de déplacement de la charge est enregistrée pour déterminer le module.
- Différents essais par pénétration sont également utilisés pour les essais de dureté sur plastique, tels que Shore (Duromètre), Rockwell, l'essai de dureté par pénétration d'une bille et Barcol.

Cette Application Notes traitera spécifiquement des essais de dureté sur métaux, la préparation mécanique des échantillons et les différents paramètres influençant le résultat de l'essai de dureté par pénétration.

2. Difficultés de préparation

Problème: 1
Il peut s'avérer difficile d'obtenir des surfaces plan-parallèles lors de la préparation, voir Figure 1. Par exemple, pour Vickers (description voir page 5), les diagonales mesurées ne devraient pas dévier de plus de 5% l'une de l'autre. Le pénétrateur devra également être perpendiculaire par rapport à la surface d'essai et ne pas dévier de cette position de plus de 2° afin de donner un résultat fiable.

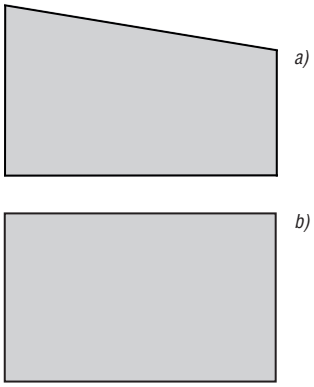


Figure 1: *Schéma de a) un échantillon non-plan, b) un échantillon plan-parallèle*

Solution: 1
Le mieux est d'utiliser un dispositif de fixation pour maintenir l'échantillon de façon à ce que le pénétrateur puisse pénétrer la surface perpendiculairement, voir Figure 2. Si aucun dispositif de fixation n'est disponible, la préparation mécanique des échantillons devra donner des échantillons avec des surfaces plan-parallèles, voir Figure 1b. Il est possible d'utiliser le porte-échantillons Figure 3A avec une surface plane sans orifices, voir Figure 3, sur lequel les échantillons sont fixés par de l'adhésif double-face pour des échantillons aussi plan-parallèles que possible. Lors de l'utilisation de Figure 3A, il est important que les échantillons soient tronçonnés à la même hauteur approximativement. Lorsque l'on utilise Figure 3B, voir Figure 3, le plan-parallélisme final des surfaces des échantillons dépend essentiellement du bridage des échantillons dans le porte-échantillons par l'utilisateur.

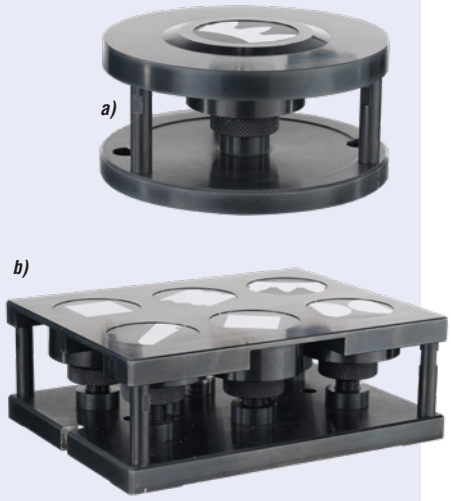


Figure 2: *Fixations pour tenir les échantillons au cours de l'essai de dureté, a) 1 x 40 mm de diam., b) 6 x 30 mm de diam.*

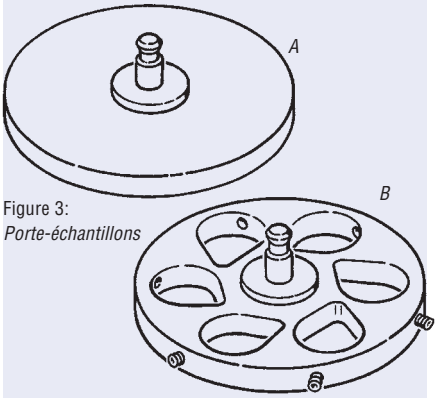


Figure 3: *Porte-échantillons*

Problème: 2
Si le fini de surface d'un échantillon est trop rugueux, il pourra s'avérer problématique de faire l'évaluation des coins d'une empreinte, particulièrement si l'on utilise un équipement automatique. Une surface réfléchissante propre est nécessaire. La préparation de la surface doit avoir une influence minimale sur les caractéristiques du matériau à tester. La préparation nécessaire de la surface va dépendre du type d'essai et de la charge appliquée. La micro-dureté (charges inférieures à 1 kgf) nécessite une surface davantage polie. Les essais Rockwell ne sont pas aussi sensibles à la préparation de la surface, car la profondeur de pénétration est mesurée et il n'y a pas de mesure optique de la géométrie de l'empreinte, donc aucune préparation nécessaire ou une simple surface prépolie.

Si la surface est trop rugueuse, les rayures de la préparation peuvent causer une erreur de lecture de la dimension de l'empreinte lors des essais de dureté automatiques.

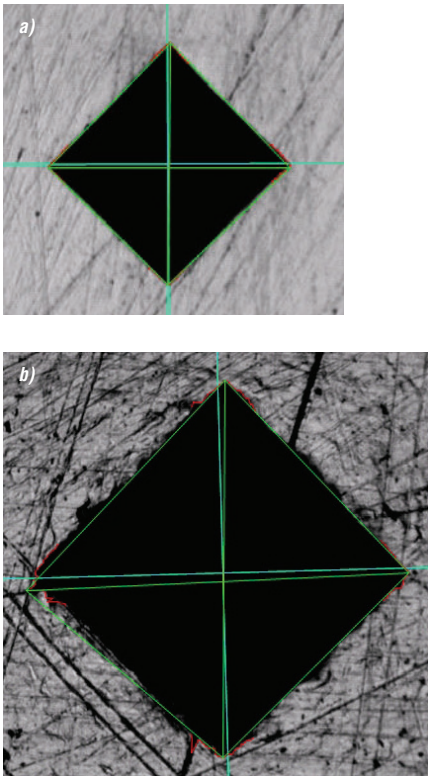


Figure 4: *Les empreintes Vickers sur la même surface de préparation grossière (9µm) pour a) Acier trempé 715 HV 10 et b) acier au carbone 0,5% 180 HV 10. Ici, 17% des empreintes de l'acier au carbone ont été jetées en raison de la surface grossière, alors qu'aucun problème n'a été rencontré pour l'acier trempé.*

Noter que les matériaux plus tendres sont plus sensibles aux artefacts de préparation vu que la même taille d'abrasifs introduira de plus grandes déformations/rayures dans la surface que dans les matériaux plus durs, voir Figure 4.

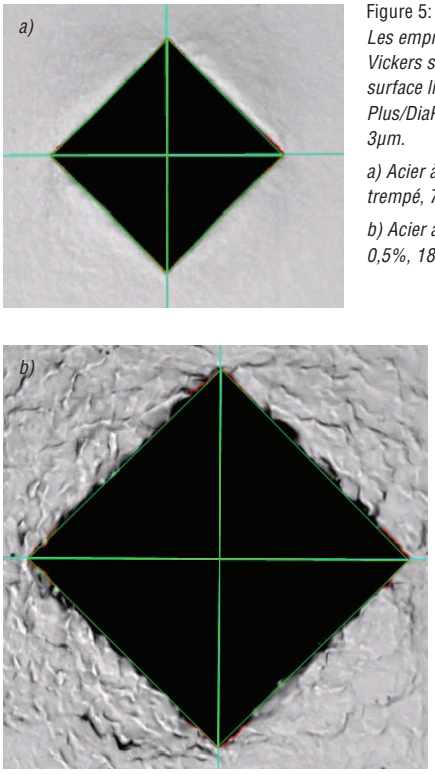


Figure 5: *Les empreintes Vickers sur une surface lisse, MD-Plus/DiaPro Plus, 3µm.*

a) Acier à outil trempé, 715 HV 10.

b) Acier au carbone 0,5%, 180 HV 10.

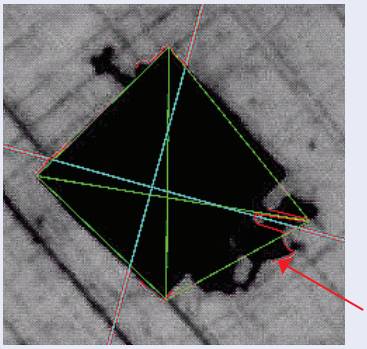


Figure 6: *Des salissures entravent la lecture optique automatique. Le matériau est de l'acier trempé. Essai de dureté Vickers. Charge 0,5 kgf1. Préparation finale sur le support MD-Largo avec la suspension diamantée DiaPro Allegro/Largo (9 µm).*

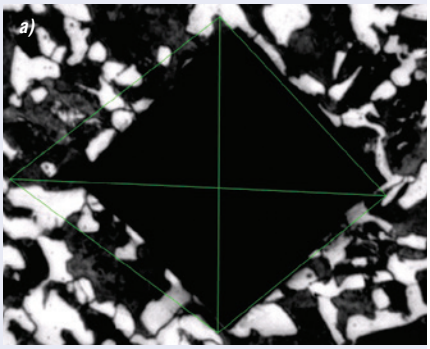
Solution: 2
Une surface polie devra être utilisée. Figure 5 montre la surface après le polissage final sur le drap MD-Plus et avec la suspension diamantée DiaPro Plus (3µm).

Problème: 3
Si l'échantillon n'est pas correctement nettoyé après la préparation mécanique et qu'a lieu une lecture optique de la dureté, une lecture automatique pourrait aboutir dans une mauvaise interprétation des coins de l'empreinte, voir Figure 6.

Solution: 3
Toujours s'assurer que les échantillons soient correctement nettoyés, sinon toutes salissures ou fibres provenant du drap de polissage, par exemple, pourraient compliquer la lecture.

Problème: 4
Pour un échantillon très attaqué, il peut s'avérer difficile d'évaluer les coins d'une empreinte, pouvant aboutir à une valeur de dureté moins précise.

Solution: 4
L'attaque doit, si possible, être évitée, car la surface alors obtenue sera moins réfléchissante. Si l'attaque est nécessaire, une attaque légère est préférable de façon à ce qu'il soit possible de distinguer les coins de l'empreinte. Parfois, il peut être nécessaire d'attaquer, par exemple pour l'évaluation d'une soudure, voir Figure 20.



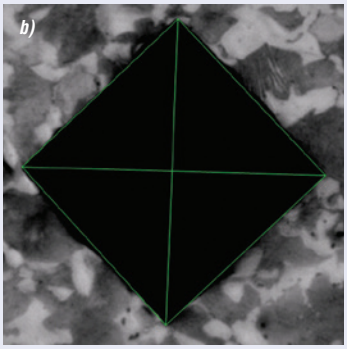
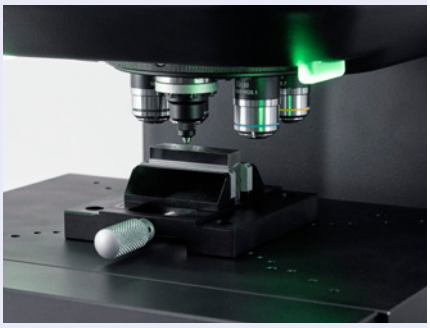


Figure 7: *Empreintes Vickers, charge 1 kgf. Le matériau est de l'acier au carbone 0,5%. L'étape de préparation finale est MD-Plus avec la suspension diamantée DiaPro Plus (3µm).*

Attaque au Nital 3% a) attaque forte b) attaque légère.



Fixation simple dans DuraVista-40

3. Description des principes

Pour les essais de dureté par pénétration, où la taille de l'empreinte est déterminée de façon optique, comme pour Vickers, Brinell et Knoop, la dureté est définie comme la charge appliquée, divisée par la face de contact (pour Knoop, il s'agit de la surface projetée). Les essais peuvent être réalisés manuellement en utilisant des tableaux où la valeur moyenne des diagonales/diamètres mesurés est convertie dans une valeur de dureté ou la valeur peut être calculée en se basant sur une formule, ou par une machine d'essai de dureté automatique où la dureté est déterminée automatiquement.

Selon la dimension de la charge appliquée, l'essai de dureté par pénétration peut être divisé en macro (également appelé général ou universel) et en essai de dureté micro. Pour les essais de dureté macro, les charges d'essai sont 1 kgf (9,81 N) ou plus grandes, alors que les essais de dureté micro couvrent une plage de charges de 1 gf à 1 kgf.

L'état de la surface requis dépend du type d'essai et de la charge utilisée. Pour la dureté macro, généralement une surface percée ou prépolie est suffisante ; parfois aucune préparation n'est requise. Pour les essais de dureté micro, une surface polie est nécessaire, pour les charges très

Tableau 1: *Exigences de la surface pour les différents essais de dureté par empreinte.*

Essai	Préparation de la surface
Rockwell HR	**Essai de dureté macro:** - pas de préparation de la surface ou - prépolie
Brinell HBW	**Essai de dureté macro:** - percée, - prépolie ou - polie
Vickers HV	**Essai de dureté macro:** - prépolie **Essai de dureté micro:** - polie - électropolie
Knoop HK	**Essai de dureté micro:** - très polie

Tourelle de DuraVista-40

petites même un polissage aux oxydes ou un polissage électrolytique peut s'avérer nécessaire.

La rugosité d'une surface n'a que peu d'influence sur la taille de l'empreinte, si l'empreinte est grande par rapport aux aspérités de la surface [1]. Il est important que la préparation de la surface n'altère pas les propriétés du matériau, c'est-à-dire que la surface ne doit montrer qu'un minimum de déformation après la préparation.

Les conversions entre les échelles de dureté sont à utiliser avec précaution. Mieux vaut éviter les conversions si possible et réaliser les essais de dureté en suivant la méthode requise. Il en va de même pour les conversions de mesures de dureté à la résistance d'un matériau, si elles ne sont pas bien fondées par des données expérimentales.

Machine d'essai Rockell, DuraVigo-150

Machine d'essai universelle, DuraVersa-100

Rockwell (HR)
Rockwell est une méthode rapide, développée pour être utilisée pour le contrôle de la production et sa lecture est directe. La dureté Rockwell (HR) est calculée en mesurant la profondeur d'une empreinte, après qu'un pénétrateur ait été forcé dans le matériau échantillon à une charge donnée. Le matériau du pénétrateur est un diamant conique, une bille en carbure fritté ou en acier, selon l'échelle utilisée. Une pré-charge minimale est appliquée avant l'application de la charge principale, puis relâchée. La lecture de la valeur de dureté a lieu pendant l'application de la pré-charge minimale, voir Figure 8.

Il existe deux types d'essais Rockwell: l'essai Rockwell régulier où la charge minimale est de 10 kgf, la charge majeure étant de 60, 100 ou 150 kgf; et Rockwell Superficiel, utilisé pour les échantillons plus minces où la charge minimale est de 3 kgf et les charges majeures sont de 15, 30 ou 45 kgf. Généralement, le matériau testé ne doit pas être enrobé dans de la résine, car l'essai Rockwell utilise le mouvement du pénétrateur pour mesurer la dureté et non la zone de pénétration. L'influence de cela va cependant dépendre de la machine utilisée.

Brinell (HBW)
La pénétration Brinell donne une empreinte relativement grande avec une bille en carbure de tungstène, dénotation HBW (W étant le symbole chimique du tungstène). La taille de l'empreinte est lue optiquement pour pouvoir déterminer la dureté. Les applications typiques sont les forgeages et les moulages où les éléments structuraux sont de grande taille et hétérogènes, ou les structures trop grossières pour d'autres méthodes (Rockwell/Vickers) pour obtenir un résultat représentatif.
Gamme de charges d'essai: de 1 à 3000 kgf
Types de pénétrateur:
billes de diamètre 1 / 2,5 / 5 / 10 mm.

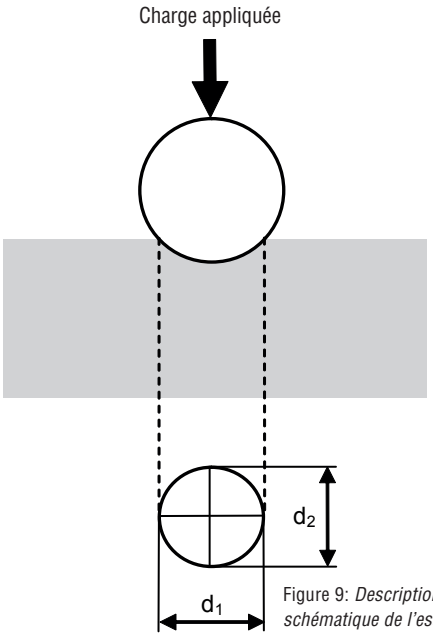


Figure 9: *Description schématique de l'essai de dureté Brinell*

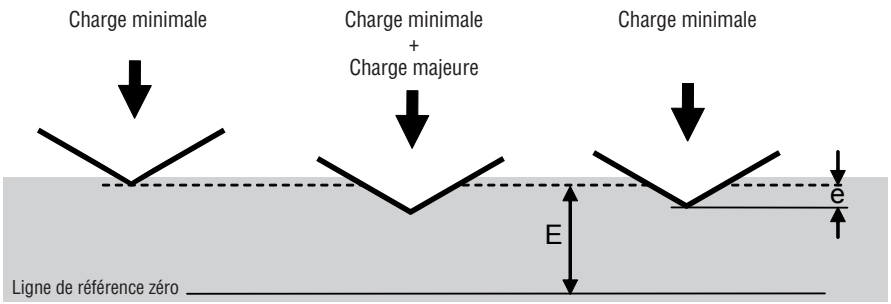
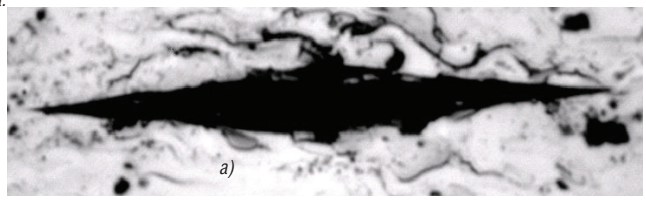
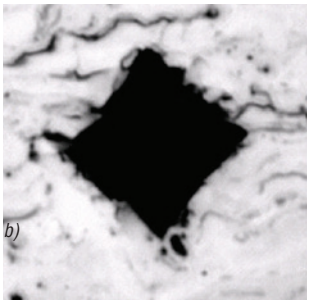


Figure 8: *Description schématique de l'essai de dureté Rockwell. Formule Rockwell: Dureté Rockwell HR = E – e. "E" est une constante de 100 (diamant) ou 130 (bille) unités. "e" est la profondeur de pénétration dans des unités de 0,002 mm.*

Figure 13: *Comparaison de la taille de l'empreinte entre a) Empreinte Knoop et b) Vickers dans revêtement plasma. Charge 0,5 kgf. L'étape de polissage finale a été réalisée sur le drap Nap et avec la suspension diamantée DiaPro Nap B (1µm).*





Vickers (HV)
La dureté Vickers (HV) est calculée en mesurant les longueurs diagonales d'une empreinte laissées en introduisant un pénétrateur diamant pyramidal à une charge spécifique dans le matériau échantillon, voir Figure 10. La taille de l'empreinte est lue optiquement afin de déterminer la dureté. La valeur de dureté peut être obtenue dans un tableau ou par une formule, après avoir déterminé la valeur moyenne des deux diagonales mesurées, ou directement dans un appareil d'essai de dureté automatique. L'échelle Vickers s'étend de 10 gf à 100 kgf. Pour les essais de dureté Vickers, la valeur de dureté obtenue est relativement peu affectée par la charge appliquée.
Pour l'espacement entre les empreintes Vickers, voir Figure 23.

Knoop (HK)
Cette méthode a été développée en alternative au pénétrateur Vickers, principalement pour parer au problème de fissure dans les matériaux friables (tels que les céramiques), mais aussi pour faciliter les essais sur les couches minces. Le pénétrateur est un diamant pyramidal asymétrique, voir Figure 11. La taille du pénétrateur est basée sur la mesure de la diagonale longue seulement, lue optiquement afin de déterminer la dureté. La gamme de charges d'essai pour Knoop variant de 10 gf à 1 kgf, Knoop est plus sensible à la préparation de la surface comparée à Vickers vu que la diagonale la plus longue résulte dans une empreinte plus creuse. L'espacement entre les empreintes dépend du matériau, voir Figure 12.
Lorsque Knoop est utilisé pour les charges plus petites, la valeur de dureté augmente alors que la charge diminue.

Une comparaison de la taille d'empreinte entre des empreintes Knoop et Vickers pour la même charge se trouve à la Figure 13.

Pour Brinell, Vickers et Knoop, il est important que les longueurs diagonales soient au moins de 20 µm ou plus, sinon la mesure risque d'être trop imprécise.

Essai de microdureté
Pour les essais de microdureté, les charges d'essai de dureté sont, comme déjà mentionné, inférieures à 1 kgf et résultent dans des empreintes très petites.
La microdureté permet d'étendre les essais de dureté à des matériaux trop minces ou trop petits pour les essais de dureté macro,

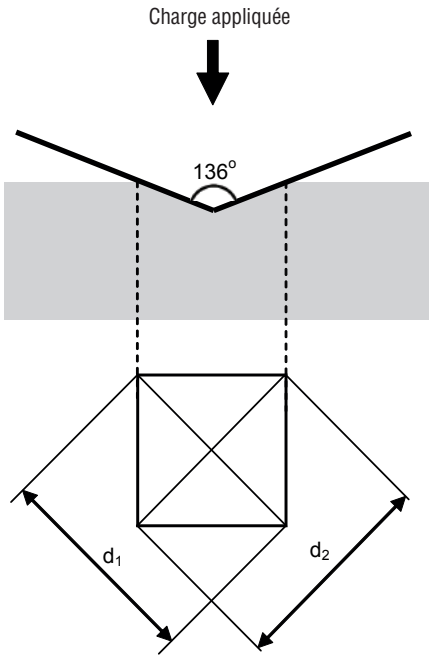


Figure 10:
Description schématique de l'essai de dureté Vickers.

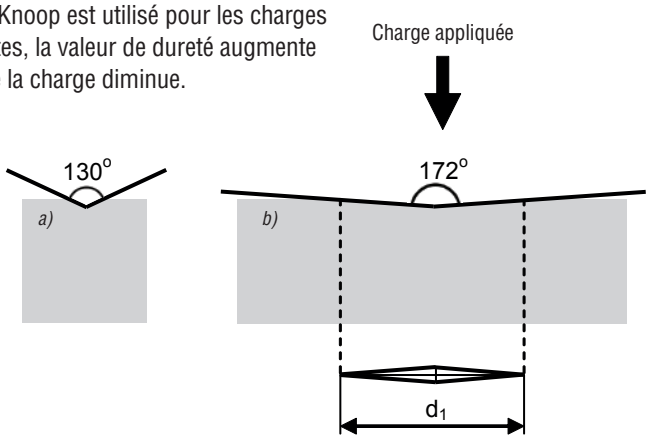


Figure 11: *Description schématique de l'essai de dureté Knoop.*
a) Vue latérale
b) Vue frontale

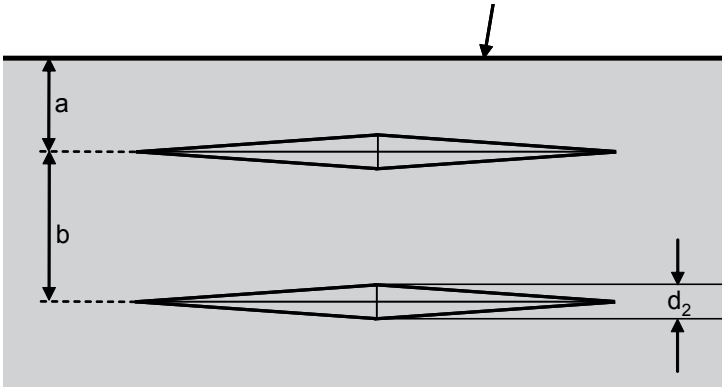
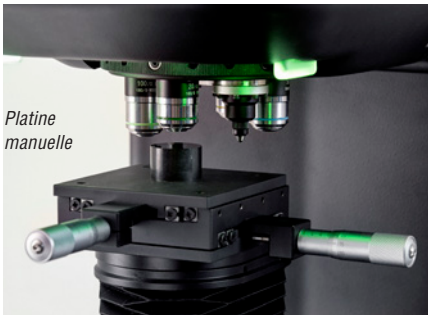


Figure 12: *L'espacement des empreintes de Knoop est basé sur la courte diagonale d2. a et b sont expliqués dans le tableau ci-dessous (ISO 4545).*

	a	b
Acier, cuivre et alliages de cuivre	$3 \cdot d_2$	$4 \cdot d_2$
Métaux légers, Pb, Sn et leurs alliages	$3.5 \cdot d_2$	$7 \cdot d_2$



la gamme de dureté allant de 1 gf à1000 gf, car des phases ou constituants et régions spécifiques ou de grands gradients de dureté sont testés. Par exemple, les couches très minces, les petits composants, les revêtements, les microsoudures, les particules de poudre métallique, les éléments structuraux individuels ou les grains.

Mieux vaut ne pas attaquer le matériau avant l'essai de dureté, car la surface deviendrait alors moins réfléchissante donnerait une empreinte dont les coins seraient plus difficiles à voir. Cependant, une attaque légère pourra aider à faire la distinction entre les différentes phases/éléments de structure quand les mesures de dureté sont réalisées sur des constituants individuels.

Egalement, plus les charges appliquées durant l'essai de dureté sont faibles, plus seront élevées les exigences relatives à la préparation de la surface qui pourra être réalisée mécaniquement, chimiquement ou électrochimiquement. Il est important qu'aucun changement des propriétés de la surface ne soit introduit dans l'échantillon au cours de la préparation en raison de la déformation à chaud ou à froid. Les déformations introduites au cours du tronçonnage et du prépolissage doivent être enlevées par un polissage jusqu'à 6, 3 ou 1 µm selon la charge appliquée. Pour les charges très faibles, inférieures à 300 gf [4], la surface doit être entièrement exempte de déformations, et les échantillons nécessitent un polissage aux oxydes ou même un polissage électrolytique pour obtenir une surface entièrement exempte de dommages. Il faut aussi se rappeler que les matériaux tendres ou/et ductiles (c'est-à-dire d'une dureté inférieure à 120-150 HV) sont plus sensibles quant à l'introduction d'artefacts de préparation.

Il est important d'avoir une surface d'essai plane pour obtenir des résultats fiables. Placer l'échantillon dans une fixation garantira que le pénétrateur est perpendiculaire à la surface d'essai.

4. Recommandations pour la préparation

Tronçonnage
Le tronçonnage ne doit introduire qu'un minimum de déformation à l'échantillon. Il est donc important de choisir la combinaison correcte de meule de tronçonnage et vitesse d'avance pour le matériau en question pour prévenir toute brûlure du matériau et pour assurer un cycle de préparation le plus court possible aux étapes suivantes.

Enrobage
L'essai[1] montre qu'il n'y a aucune influence significative des résines, voir Figure 14, pour des charges d'essai jusqu'à au moins 30 kgf (Vickers). (Les essais ont été réalisés avec deux résines d'enrobage à chaud DuroFast (époxy avec charge minérale) et MultiFast (système d'enrobage phénolique avec charge) et une résine d'enrobage à froid, ClaroCit (résine acrylique).
Si la netteté des bords est nécessaire comme pour les revêtements minces ou les aciers à surface traitée, une résine avec charge devra être utilisée. Pour l'acier trempé, DuroFast est adéquate. Pour les matériaux/revêtements plus tendres (inférieurs à 400HV) LevoFast (mélamine avec charge minérale et verre) est adéquate.

Prépolissage et polissage
La méthode de prépolissage et polissage dépend du matériau à tester. Pour les métaux ferreux, une méthode commune est présentée au Tableau 2. Elle est adéquate pour la plupart des nuances d'acier/traitements thermiques, par exemple l'acier cémentée. Le polissage final est accompli avec une suspension diamantée 3 µm. Il s'agit d'une méthode rapide offrant une surface réfléchissante adéquate pour les essais de dureté. Pour l'aluminium plus tendre, la méthode du Tableau 3 est recommandée. La Figure 15 montre l'évaluation automatique de la dureté de l'aluminium 99,95% après le tronçonnage ainsi qu'après différentes étapes de préparation mécanique. Pour la préparation des différents matériaux, voir e-Metalog (www.struers.com). Les données contenues dans les Tableaux 2 et 3 sont pour 6 échantillons enrobés, 30 mm de diamètre, bridés dans un porte-échantillons.

[1]Les essais ont été réalisés avec de l'acier au carbone 0,5% et acier à outils trempé, les diamètres de l'échantillon d'acier enrobé étaient 25 et 32 mm respectivement. Tous les enrobages faisaient 40 mm de diamètre. Chaque colonne dans la Figure 14 représente 3 séries de 12 empreintes exceptée ClaroCit pour laquelle seulement une série d'essais a été réalisée.

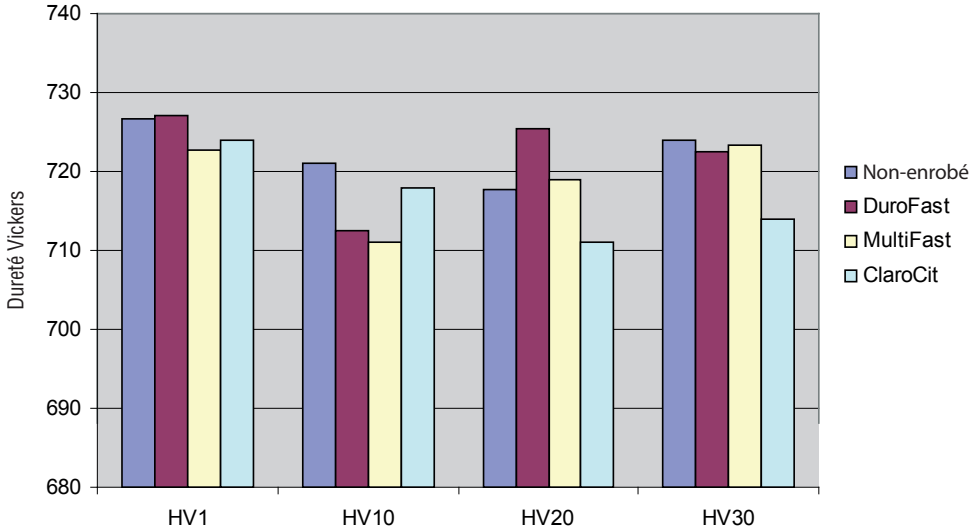


Figure 14: *Des résultats d'essais pour évaluer l'influence des résines sur les essais de dureté.*
Ici, les échantillons ont été placés directement sur une enclume lors de l'essai. Le matériau est de l'acier à outil trempé. L'étape de polissage finale a été réalisée sur un drap MD-Plus avec la suspension diamantée DiaPro Plus (3µm).

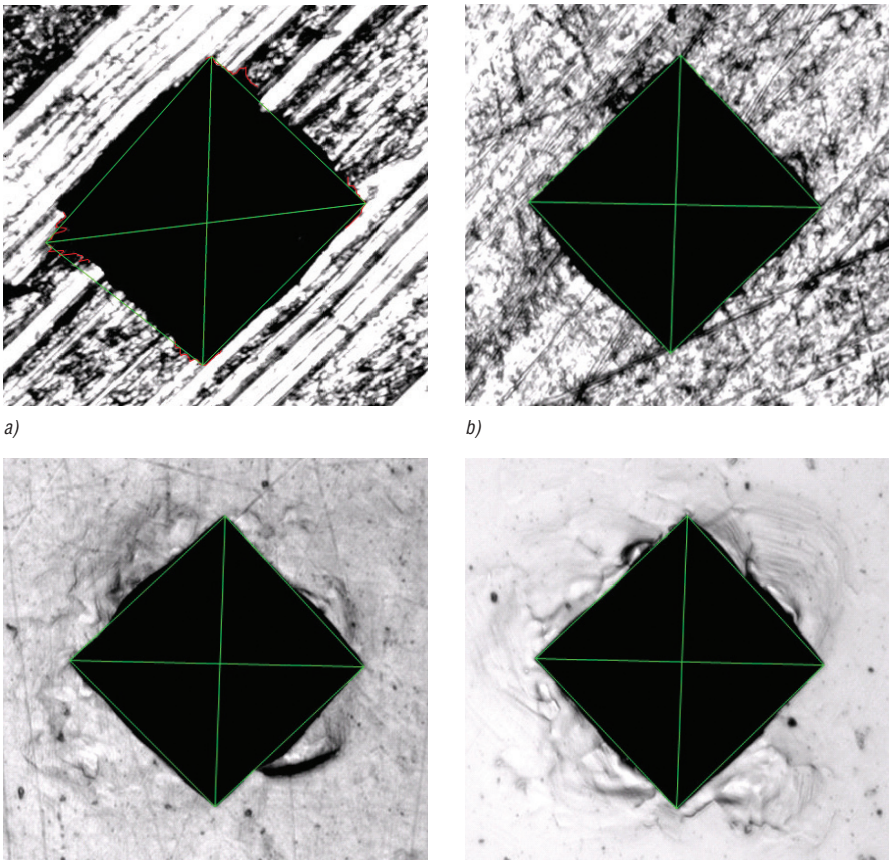
Etape	PG	FG 1	P 1
Support	MD-Piano 220	MD-Allegro	MD-Plus
Type d'abrasif		DiaPro Allegro/Largo	DiaPro Plus
Type de lubrifiant	Eau		
Vitesse [t/m]	300	150	150
Force [N]	240	240	180
Sens porte-éch.	>>	>>	>>
Temps [mn]	1	3	3

Tableau 2: *Méthode de préparation de l'acier. Pour six échantillons enrobés de 30 mm de diamètre.*

Etape	PG	FG 1	P 1	OP
Support	Papier SiC #320	MD-Largo	MD-Mol	MD-Chem
Type d'abrasif		DiaPro Allegro/Largo	DiaPro Mol	OP-U 0.04 µm
Type de lubrifiant	Eau			
Vitesse [t/m]	300	150	150	150
Force [N]	120	180	150	90
Sens porte-éch.	>>	>>	>>	><
Temps [mn]	1	4	3	2

Tableau 3: *Méthode de préparation de l'aluminium tendre. Pour six échantillons enrobés de 30 mm de diamètre.*

Lors de l'utilisation de surfaces très finement polies, c'est à dire après polissage aux oxydes, il faut noter que OP-U crée moins de relief que OP-S.



a) *b)* *c)* *d)*

Figure 15: *Essai de dureté Vickers, HV1 d'aluminium 99,95% a) directement après le tronçonnage b) après le prépolissage fin sur MD-Largo et la suspension diamantée DiaPro Allegro/Largo (9 µm) c) après un polissage sur MD-Mol et DiaPro Mol (3 µm) d) après un polissage aux oxydes sur MD-Chem et OP-U (silice colloïdale 0,04 µm).*

5. Applications

Profondeur de la couche de traitement

Pour accroître la résistance à l'usure, les aciers sont trempés en surface pour les utilisations dans les pièces mobiles et rotatives telles que les engrenages, les buses, les pièces de moteur, etc.

Une mesure quantitative du changement de dureté peut être obtenue par une transverse de dureté.

Les mesures de la profondeur de la couche de traitement (CHD) sont utilisées pour déterminer l'épaisseur de la couche de surface trempée de l'acier. Les procédures sont standardisées et l'évaluation de la profondeur de la couche de traitement dépend de la méthode utilisée lors du durcissement de la surface, par exemple si celle-ci a été durcie par induction, carburée ou nitrurée, etc.

Dans la plupart des cas, les essais de dureté Vickers sont utilisés dans la gamme de charges de microdureté. (Dans certains cas, Knoop peut être utilisé).

Figure 16: *Mesure de la profondeur de la couche cémentée. La taille croissante des empreintes vers le centre de l'échantillon indique une dureté décroissante du matériau.*

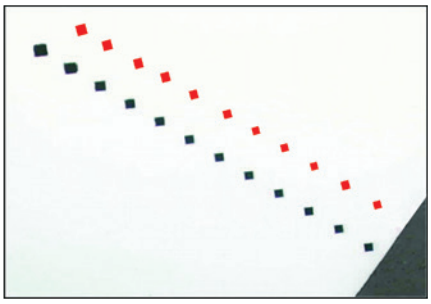
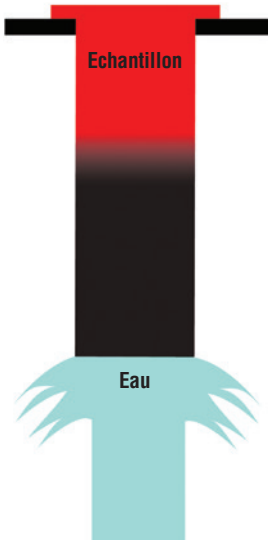
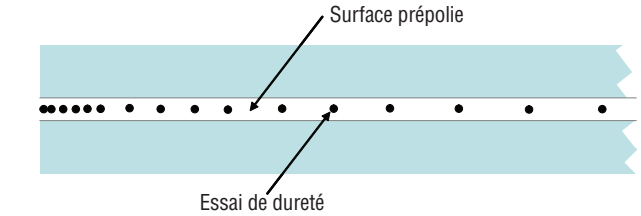


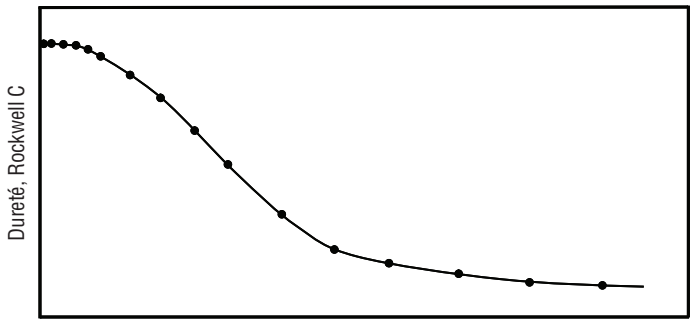
Figure 17: *Empreintes formant un zig-zag.*

Figure 18: *Description schématique de l'essai Jominy*

(Par exemple Numéro Jominy: J15 = 35 HRC signifie que la dureté 35 HRC est mesurée à une distance de 15 mm à partir de l'extrémité refroidie à l'eau)







Distance à partir de la surface de l'extrémité refroidie à l'eau

La netteté des bords est nécessaire pour la mesure des revêtements minces ou des surfaces traitées thermiquement. Lorsque l'on effectue une CHD, la taille des empreintes augmentera au fur et à mesure que la dureté diminue, voir Figure 16. Afin de maintenir la distance minimum permise entre les empreintes (pour l'acier, 3x la diagonale), l'espacement automatique des empreintes pourra être utilisé. Alors que la taille de l'empreinte augmente, la distance entre les empreintes augmentera également.

Traditionnellement, un grand nombre d'empreintes doivent être réalisées pour atteindre la limite de dureté. Cependant, il est possible, avec les appareils d'essai de dureté modernes, d'arrêter automatiquement lorsque le numéro de dureté défini a été atteint, en dépit du nombre de points d'essais qui ont été définis.

Il faut un espacement minimum des empreintes, car les empreintes ne doivent pas s'influencer l'une l'autre. Afin d'accroître le nombre d'empreintes et la précision dans les séries d'essais, les empreintes peuvent être déplacées les unes par rapport aux autres pour former un zig-zag, voir Figure 17.

Essai Jominy

Avec l'essai Jominy, il est possible de tester la trempabilité d'un acier. Une barre d'essai de forme géométrique spécifique est chauffée à température d'austénisation. Ensuite, l'extrémité est refroidie par jet d'eau standardisée, voir Figure 18. Après refroidissement, une face de la barre est prépolie et la dureté est mesurée (HV 30 ou HRC) en intervalles à partir de l'extrémité trempée, voir Figure 19. Selon le taux de refroidissement (distance à partir de l'extrémité refroidie à l'eau) il y aura des différences dans la dureté mesurée.

Soudure

Les essais de dureté sur soudures impliquent généralement qu'une série d'empreintes soit réalisée sur une surface d'échantillon relativement grande, en rapport étroit avec la forme géométrique de l'échantillon. Une caméra d'observation macro permet d'observer la surface de l'échantillon dans son intégralité et d'afficher facilement les endroits où les empreintes doivent être réalisées. Les normes de soudure prescrivent l'utilisation de HV 5 ou HV 10.

Un exemple d'emplacement des empreintes d'essai de dureté pour la validation d'une soudure est montré à la Figure 20. Avant de procéder à l'essai de dureté, la surface d'essai est polie jusqu'à 3 µm, puis légèrement attaquée préalablement au test.

Pour la préparation des soudures, voir la Application Notes traitant de ce sujet.

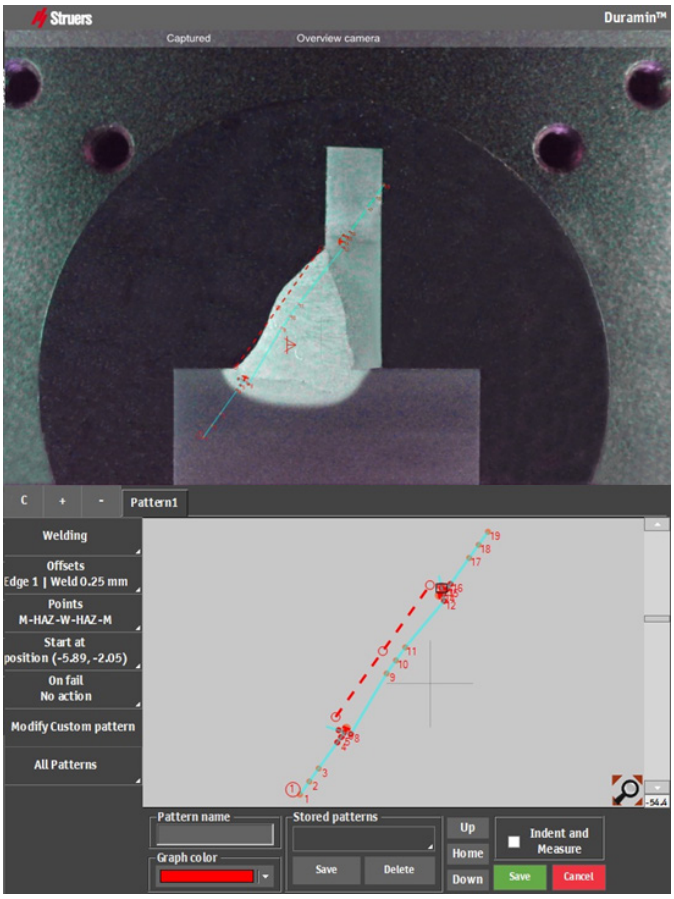


Figure 20: Positionnement des points d'essai sur soudure à l'aide d'une caméra d'observation macro.

Charge appliquée	Empreinte	Pénétrateur	Autres
Précision	Vitesse	Mouvement latéral	Enclume, meuble de support
Répétabilité	Inertie	Forme déviations	Broche
	Angle	Dommage	Déflection de l'échantillon
	Temps	Matériau	Mise à niveau de la machine
	Espacement		

Tableau 5: *Facteurs liés aux instruments*

6. Contrôle des paramètres

Les essais de dureté sont considérés comme assez simples à réaliser lorsque tous les paramètres sont sous contrôle. Pour cette raison, il est recommandé d'avoir des connaissances de base sur le sujet. Ci-dessous, nous allons donner un bref aperçu des paramètres influençant l'essai de dureté.
Les différents paramètres peuvent être répartis en cinq facteurs principaux influençant les essais de dureté et sont en rapport avec l'instrument, la mesure, le matériau, l'opérateur et l'environnement, voir la Figure 21. Il est important de s'efforcer continuellement d'éliminer, de minimiser ou au moins de prendre en compte l'influence de ces facteurs, qui seront mentionnés/discutés dans ce qui suit:

Facteurs en rapport avec l'opérateur
L'opérateur doit être parfaitement instruit dans l'utilisation de l'équipement d'essai de dureté, connaître les exigences relatives à la surface et les techniques de fixation, afin d'utiliser la machine aussi efficacement que possible et ainsi minimiser le travail nécessaire au cours de l'essai.

Facteurs relatifs à l'environnement
L'essai de dureté devra être réalisé sur une surface lisse, propre et réfléchissante (pour Vickers, Brinell et Knoop). Il est important que les essais se déroulent dans des conditions de température et d'humidité constantes. Pour les pénétrateurs à lecture optique, il est nécessaire de considérer que l'illumination influence l'interprétation de la taille de l'empreinte. Donc, l'appareil d'essai de dureté devra de préférence être placé dans un environnement sombre pour maintenir constante l'illumination. Toutes vibrations provenant des alentours affecteront la mesure et devront être minimisées. Les charges plus faibles sont plus sensibles aux vibrations. Pour cette raison, il est recommandé de placer l'appareil d'essai de dureté sur une base spéciale (par exemple une table en granit).
Les surfaces devront être exemptes de toute contamination telle que tartre, salissure, huile et graisse. Une mince pellicule lubrifiante réduira le coefficient de friction, ce qui résultera dans des empreintes plus grandes pour une charge donnée, c'est à dire que l'on observera une légère diminution de la dureté. Ici, il est important de conserver la même condition des surfaces pour toutes les mesures afin d'obtenir des résultats comparables.

Facteurs relatifs à l'instrument
Pour ce qui est des facteurs relatifs à l'instrument, la charge, l'empreinte et le pénétrateur doivent être pris en considération. Pour obtenir la précision et la répétabilité nécessaires de la charge appliquée, une technologie de cellule de charge est préférable car elle est plus précise que les systèmes à poids morts, c'est à dire aucune influence de friction et d'inertie dans le système. Pour répondre aux exigences de précision de la charge appliquée, il est également important d'étalonner régulièrement le système. Dans le travail quotidien, il s'agit principalement d'une vérification indirecte, en utilisant les blocs d'étalonnage, disponibles pour différents niveaux de dureté et permettant de vérifier l'étalonnage dans la gamme de dureté utilisée. Les paramètres affectant l'empreinte sont énumérés dans le Tableau 5. L'angle de l'empreinte ne devra pas dévier de plus de 2 degrés (maximum) de la ligne perpendiculaire, sinon des erreurs pourront être introduites. Il ne devra pas non plus y avoir de mouvement latéral entre le pénétrateur et l'échantillon. Si possible, l'échantillon devra être bridé dans une enclume exempte de toute bavure.

L'espacement entre les empreintes devra être suffisamment grand pour que les empreintes ne s'influencent pas l'une l'autre. La déformation plastique autour d'une empreinte causera le durcissement de la plupart des matériaux, donc si les empreintes sont trop rapprochées, le matériau apparaîtra plus dur. Le principe de développement de la zone plastique (zone bleue) pour un pointeau plat (jaune) est illustré à la Figure 22.

Pour cette raison, les normes servant pour les différents essais donnent les spécifications pour l'espacement entre les empreintes et l'espacement par rapport au bord, pour l'essai de dureté Vickers, l'instruction donnée par ISO est indiquée à la Figure 23.

Facteurs relatifs au matériau
Les facteurs relatifs au matériau sont:

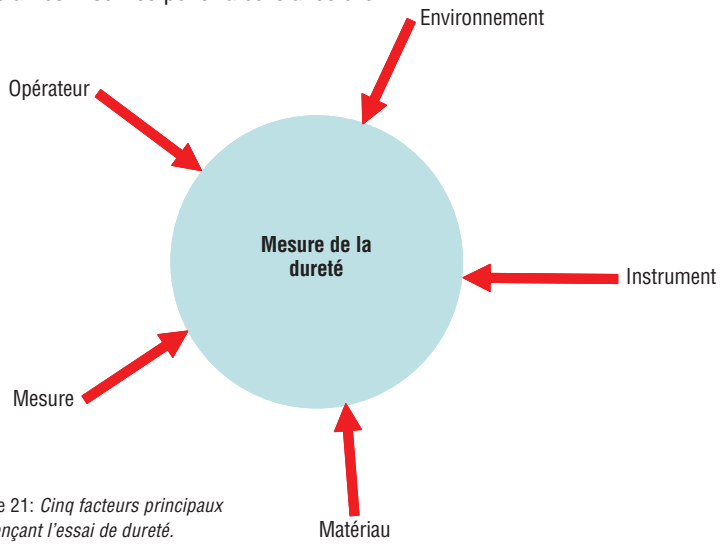


Figure 21: *Cinq facteurs principaux influençant l'essai de dureté.*

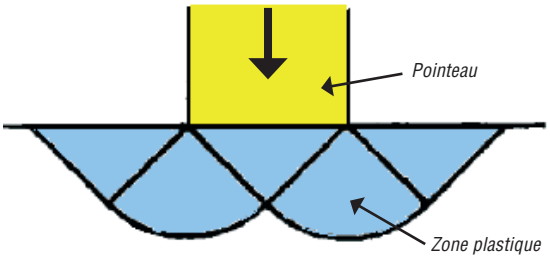
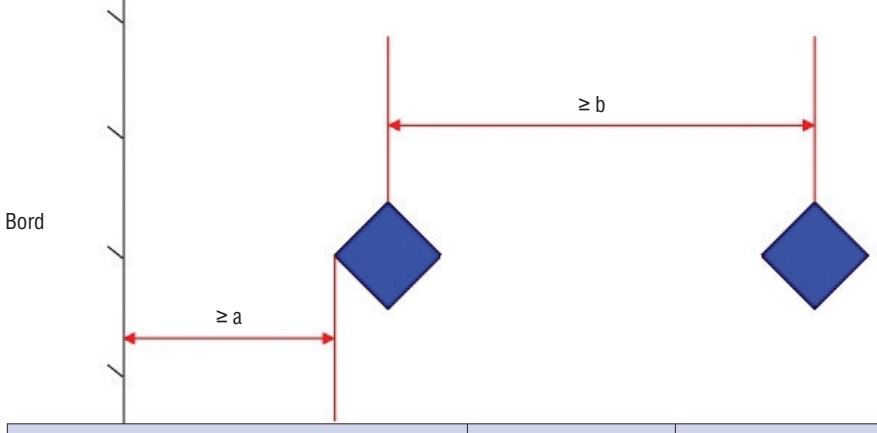


Figure 22: *Champ des contraintes de glissement de la zone plastique (zone bleue) développement de l'empreinte d'un pointeau plat rigide (jaune) selon Prandtl.*



	a	b
Acier, cuivre et alliages de cuivre	$2.5 \cdot d_m$	$3 \cdot d_m$
Métaux légers, Pb, Sn et leurs alliages	$3 \cdot d_m$	$6 \cdot d_m$

Figure 23: *Espacement entre les empreintes Vickers selon ISO 6507, a et b sont expliqués dans le tableau ci-dessous, où dm est la diagonale moyenne d'une empreinte.*

- Hétérogénéité de la microstructure
- Qualité de la préparation de l'échantillon
- Réflectivité/transparence de la surface de l'échantillon
- Type de matériau
- Traitement du matériau
- Forme du matériau
- Résine d'enrobage

Procédure utilisée	Système de vérification	Autres
Méthode appliquée (HV, HB, HR, HK)	Etalonnage des systèmes de charge	Vibrations
Praticabilité de la méthode	Grossissement de l'objectif	Saliss., poussière, débris
Norme à suivre (ASTM,ISO, JIS)	Résolution de l'objectif	
	Qualité de l'image inadéquate	
	Uniformité de l'éclairage	

Tableau 6: *Facteurs liés à la mesure.*

Une épaisseur d'échantillon adéquate est nécessaire; l'empreinte ne devra pas pénétrer dans l'intégralité de l'échantillon. Il est important qu'il n'y ait aucune déformation visible présente au dos de la pièce d'essai après l'essai de dureté.
Pour cette raison, l'épaisseur de l'échantillon devra représenter au moins 10 fois la profondeur de l'empreinte (Rockwell). Pour Vickers, elle doit représenter au moins 1 fois ½ la longueur diagonale de l'empreinte.

Des corrections devront être apportées, lors de la mesure, sur les surfaces sphériques et cylindriques. Le facteur de correction va dépendre de si la surface est concave ou convexe. Ces facteurs de correction peuvent être trouvés manuellement dans des tableaux ou être déjà incorporés dans des appareils d'essai de dureté plus récents. Pour les échantillons ronds, des enclumes spéciales devront également être utilisées (voir Figure 24) ainsi que des facteurs de correction pour les surfaces convexes.

Pour un choix d'un type d'essai de dureté adéquat, il est important que la superficie de l'empreinte couvre tous les éléments structuraux différents présents dans le matériau testé afin d'obtenir une empreinte représentant l'intégralité de la structure du matériau. Par exemple, pour une structure coulée, l'essai de dureté sera de préférence réalisé avec Brinell, vu que ce type de structure est assez hétérogène et que donc une empreinte plus grande est nécessaire pour couvrir les différents éléments structuraux.

Facteurs relatifs à la mesure
Les facteurs relatifs à la mesure se trouvent au Tableau 6. Si un appareil d'essai de dureté est utilisé pour accomplir plusieurs essais de dureté différents, il est nécessaire de vérifier chaque essai séparément. Avant de procéder à la vérification, il faudra vérifier que l'illumination n'affecte pas les lectures.

Pour les appareils d'essai de dureté basés sur des lectures optiques, des charges aussi élevées que possible devront être utilisées afin de minimiser les erreurs.
La longueur diagonale/ le diamètre de l'empreinte devra dépasser 20 µm. Pour Vickers, la différence de longueur diagonale pour la même empreinte devra être inférieure à ±5%. Pour des résultats optimaux, la diagonale devra, quand cela est possible, représenter entre 25 et 75% du champ de vision de l'objectif. Lors de la détermination des grands gradients de dureté, par exemple pour la trempe d'une surface, cette exigence pourra être difficile à satisfaire.
Il est important que le pénétrateur ne comporte aucun défaut en surface afin d'obtenir des résultats fiables. Mieux vaut le contrôler quotidiennement par inspection visuelle d'une empreinte dans un bloc de référence, pour s'assurer qu'il n'y a aucun défauts, ni fissures, etc. dans la surface du pénétrateur (Vickers ISO 6507). Dès le moment où un défaut est présent dans le pénétrateur, aucun résultat fiable ne pourra être obtenu.

Machine d'essai Rockwell, Duramin-160

7. Quelle méthode dois-je utiliser?

Vickers est la méthode la plus universelle, car elle n'utilise qu'un seul pénétrateur et de nombreuses charges (gamme de dureté micro/macro). Elle peut être utilisée pour tous les matériaux et de nombreuses applications (mesures de la couche de dureté, essais Jominy, soudures, céramique et revêtements), mais nécessite un fini de surface relativement bon.

Knoop utilise moins de charges (gamme de dureté micro) comparé à Vickers et est particulièrement adéquat pour les céramiques et les revêtements minces, et nécessite aussi un bon fini de surface.

Brinell est une méthode adéquate pour les métaux hétérogènes et les métaux contenant des éléments structuraux grossiers, comme par exemple les pièces coulées et forgées. Limitée aux échantillons plus grands en raison des charges élevées et des pénétrateurs utilisés – en particulier les fontes, l'acier et l'aluminium.

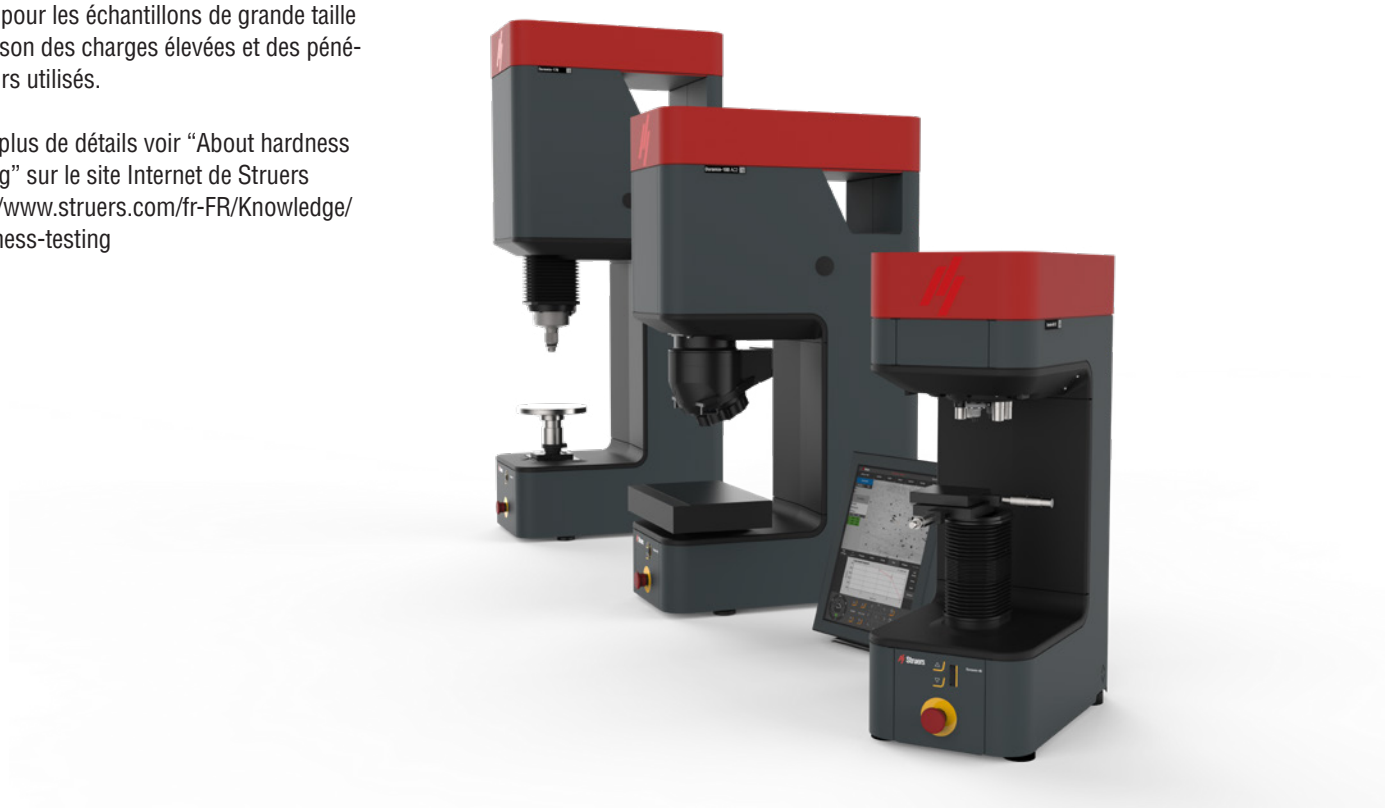
Rockwell peut être utilisée pour la plupart des matériaux, mais généralement uniquement pour les échantillons de grande taille en raison des charges élevées et des pénétrateurs utilisés.

Pour plus de détails voir "About hardness testing" sur le site Internet de Struers http://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Hardness-testing

8. Résumé

Les essais de dureté représentent un outil utile pour l'évaluation des matériaux, le contrôle qualité des processus de fabrication ainsi que dans les stations de recherche et développement. La technique utilisée pour les essais de dureté devra être choisie en rapport avec l'application. Le niveau de préparation doit être déterminé selon les propriétés du matériau et la charge d'essai.

Nos essais ont montré qu'il n'y a aucune influence significative de la résine d'enrobage au moins jusqu'à 30 kgf pour les essais de dureté Vickers, ni si l'échantillon est placé directement sur l'enclume, ni s'il est placé dans une fixation. Plus la charge est faible, plus la préparation de la surface devra être fine. Il faudra prendre en considération que les matériaux plus tendres (moins de 120 HV environ) seront plus enclins aux artefacts de préparation.



Struers ApS
Pederstrupvej 84
DK-2750 Ballerup, Denmark
Phone +45 44 600 800
Fax +45 44 600 801
struers@struers.dk
www.struers.com

Application Notes

Essais de dureté et préparation d'échantillons

Maria Lindegren, Struers ApS

Remerciements

Exemple de soudure, Figure 20 et Tableau 4: offerte par l'Institut de Soudure, France

Peter Bucan, Struers ApS
Jean-Marie Boccalini, Struers S.A.S., France

Bibliographie

1. Tabor, D; "The Hardness of Metals", Oxford University Press, 2007
2. Vander Voort, Georg F., "Metallography Principles and Practice", ASM International, 1999
3. Palmqvist, S: "Method for determining the toughness of brittle materials, particularly sintered carbides", Jernkontorets annaler, volume 141, 1957
4. ASMinternational, volume 8
5. Rockwell: Applicable Standards: ASTM E18 / ISO 6508 / JIS Z 2245
6. Brinell: Applicable Standards: ASTM E10 / ISO 6506 / JIS Z 2243
7. Vickers: Applicable Standards ASTM E384 – micro force ranges – 10g to 1kg
   ASTM E92 - macro force ranges - 1kg to 100kg
   ISO 6507 - micro and macro ranges JIS Z 2244
8. Knoop: Applicable Standards: ASTM E384 / ISO 4545 / JIS Z 2251
9. Kay Geels, "Metallographic and Materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis and hardness testing", ASTM International, 2006

Glossaire

D'autres dénotations plus anciennes pour les essais de dureté Vickers sont VHN (Vickers Hardness Number) et DPN (Diamond-Pyramide hardness Number).

Knoop; une dénotation plus ancienne est KHN (Knoop Hardness Number).

09.2024 / 62340510