
**Céramiques techniques —
Détermination de la résistance à
l'abrasion des revêtements par essai
d'abrasion à micro-échelle**

*Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) —
Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-scale
abrasion test*

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 26424:2008

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f8c4a4d2-15a1-40fd-a2bc-fb93d1b1a1b8/iso-26424-2008>



iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

ISO 26424:2008

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f8c4a4d2-15a1-40fd-a2bc-fb93d1b1a1b8/iso-26424-2008>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2008, Publié en Suisse

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Ch. de Blandonnet 8 • CP 401
CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland
Tel. +41 22 749 01 11
Fax +41 22 749 09 47
copyright@iso.org
www.iso.org

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Signification et usage	1
5 Principe	2
6 Appareillage et matériaux	2
6.1 Système d'essai	2
6.2 Billes d'essai	2
6.3 Boue abrasive	3
6.4 Mesurage des dimensions du cratère	4
7 Préparation des éprouvettes	5
8 Mode opératoire d'essai	5
8.1 Différents types d'essai	5
8.1.1 Type A: aucune perforation du revêtement	5
8.1.2 Type B: perforation du revêtement	5
8.2 Essai de type A: aucune perforation du revêtement	5
8.3 Essai de type B: perforation du revêtement	7
9 Analyse des résultats	9
9.1 Essai de type A: aucune perforation du revêtement	9
9.1.1 Équations de base	9
9.1.2 Calcul de K_c	9
9.2 Essai de type B: perforation du revêtement	10
9.2.1 Équations de base	10
9.2.2 Calcul de K_c et K_s	10
10 Reproductibilité, répétabilité et limites de l'essai	11
10.1 Reproductibilité et répétabilité	11
10.2 Limites	12
11 Rapport d'essai	13
Annexe A (informative) Mesurage de l'épaisseur du revêtement	15
Bibliographie	16

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'OMC concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: [Avant-propos — Informations supplémentaires](http://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/18c4a4d2-15a1-401d-a2bc-fb93d1b1a1b8/iso-26424-2008).

L'ISO 26424 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 206, *Céramiques techniques*.

Céramiques techniques — Détermination de la résistance à l'abrasion des revêtements par essai d'abrasion à micro-échelle

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale traite d'une méthode permettant de mesurer le taux d'usure par abrasion des revêtements céramiques au moyen d'un essai de micro-usure par abrasion basé sur la technique bien connue d'abrasion d'une calotte sphérique utilisée pour déterminer l'épaisseur du revêtement dans l'ISO 26423 [1].

Cette méthode permet d'obtenir des données relatives aux taux d'usure du revêtement et du substrat, que ce soit en réalisant deux types d'essai différents ou en analysant minutieusement les données issues d'une série d'essais d'un seul type.

Cette méthode peut s'appliquer aux échantillons disposant de surfaces planes ou non planes, mais l'analyse des résultats décrite à l'Article 9 ne peut être utilisée que pour les échantillons plats. En ce qui concerne les échantillons non plats, il y a lieu de procéder à une analyse plus complexe, nécessitant éventuellement l'application de méthodes numériques.

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables à l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 3290-1, *Roulements — Billes — Partie 1: Billes de roulement en acier*

ISO/IEC 17025, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

taux d'usure par abrasion

coefficient d'usure par abrasion

K

volume de matière éliminée par longueur de glissement sous une charge de contact normale de 1 N

4 Signification et usage

Bien que peu de revêtements protecteurs soient soumis à un seul processus d'usure, la résistance de ces revêtements à l'usure par abrasion peut jouer un rôle décisif dans leur performance. Par conséquent, connaître la résistance des revêtements céramiques à l'usure par abrasion permet de choisir correctement les revêtements correspondant aux applications dans lesquelles l'abrasion est un facteur important de dégradation. Des techniques existent pour mesurer le comportement d'usure par abrasion des matériaux en vrac et des films épais (voir Référence [1] à [3]), mais ces techniques ne sont pas facilement applicables aux films minces et leurs résultats sont difficiles à interpréter lorsqu'elles sont utilisées sur des surfaces courbes.

Le but de la présente Norme internationale est de fournir une méthode permettant de mesurer la résistance à l'abrasion des revêtements minces ou épais, et des matériaux en vrac. L'essai peut être réalisé sur des surfaces planes ou des surfaces dont le rayon de courbure est connu et ne nécessite qu'une surface d'éprouvette de quelques millimètres carrés. Toutefois, les calculs décrits à l'Article 9 s'appliquent uniquement aux éprouvettes plates et ne sont applicables qu'aux revêtements à couche unique homogène. Des erreurs peuvent survenir si l'essai est effectué sur des revêtements non homogènes. Les Références [4] et [5] fournissent des détails sur les traitements analytiques permettant de déterminer le taux d'usure des revêtements déposés sur des surfaces courbes.

En analysant les résultats de manière appropriée, c'est-à-dire lorsqu'une pénétration du revêtement se produit comme indiqué en 9.2, il est possible d'obtenir des coefficients d'usure par abrasion à la fois pour le revêtement et pour le substrat, à partir d'une série d'essais d'un seul type.

Bien que l'essai soit conçu pour permettre un mesurage quantitatif des coefficients d'usure par abrasion, il peut convenir pour un essai de contrôle de la qualité sur des composants réels.

5 Principe

Lors de l'essai, une bille est mise en rotation contre l'éprouvette et une boue abrasive est amenée sur la zone de contact. Une dépression sphérique dont la taille est mesurée est ainsi obtenue. En cas d'absence de perforation du revêtement, le taux d'usure du revêtement peut se mesurer à partir d'un seul cratère. En revanche, si le revêtement est perforé, les taux d'usure du revêtement et du substrat peuvent être calculés en réalisant une série de cratères et en mesurant leurs dimensions.

6 Appareillage et matériaux

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

6.1 Système d'essai

Utiliser une bille pouvant être mise en rotation contre l'éprouvette revêtue. La Figure 1 présente deux variantes du système à bille: dans la première, l'éprouvette, montée sur un levier à contrepoids, est appuyée sur une bille entraînée directement; dans la deuxième, le poids propre de la bille fait pression sur l'éprouvette.

NOTE Il a été démontré [6] que les résultats obtenus à l'aide des systèmes à bille en rotation libre [voir Figure 1 a)] peuvent varier en fonction de la précision de la géométrie du système. Dans certains cas, il a été prouvé que l'angle d'inclinaison du porte-éprouvette et la largeur de la rainure de l'arbre d'entraînement portant la bille peuvent influencer fortement sur les résultats. Un angle d'inclinaison de 60° à 75° et une rainure dans l'arbre de 10 mm de largeur permettent d'obtenir la variabilité la plus faible dans des conditions type.

Le système d'essai doit être construit de manière à ce que la vitesse de rotation de la bille reste constante lors de n'importe quel essai; de plus, cette vitesse doit avoir une reproductibilité meilleure que $\pm 10\%$ de la valeur nominale entre les essais. Le faux-rond total de l'arbre d'entraînement ne doit pas dépasser 20 μm au niveau des points de contact avec la bille.

6.2 Billes d'essai

Les billes utilisées sont généralement en acier trempé (par exemple, UNS G52986 (SAE 52100)) et ont un diamètre de 25 mm; elles doivent, avant tout conditionnement, être conformes aux exigences de l'ISO 3290-1.

NOTE 1 Les billes peuvent être polies, mais il a été démontré [7] que leur comportement en essai est irrégulier et que les résultats obtenus sont peu fiables si elles sont utilisées sans conditionnement.

Le traitement de conditionnement recommandé consiste à soumettre la bille d'essai neuve à au moins 300 révolutions sur une partie non critique de l'éprouvette ou sur toute autre surface appropriée, dans

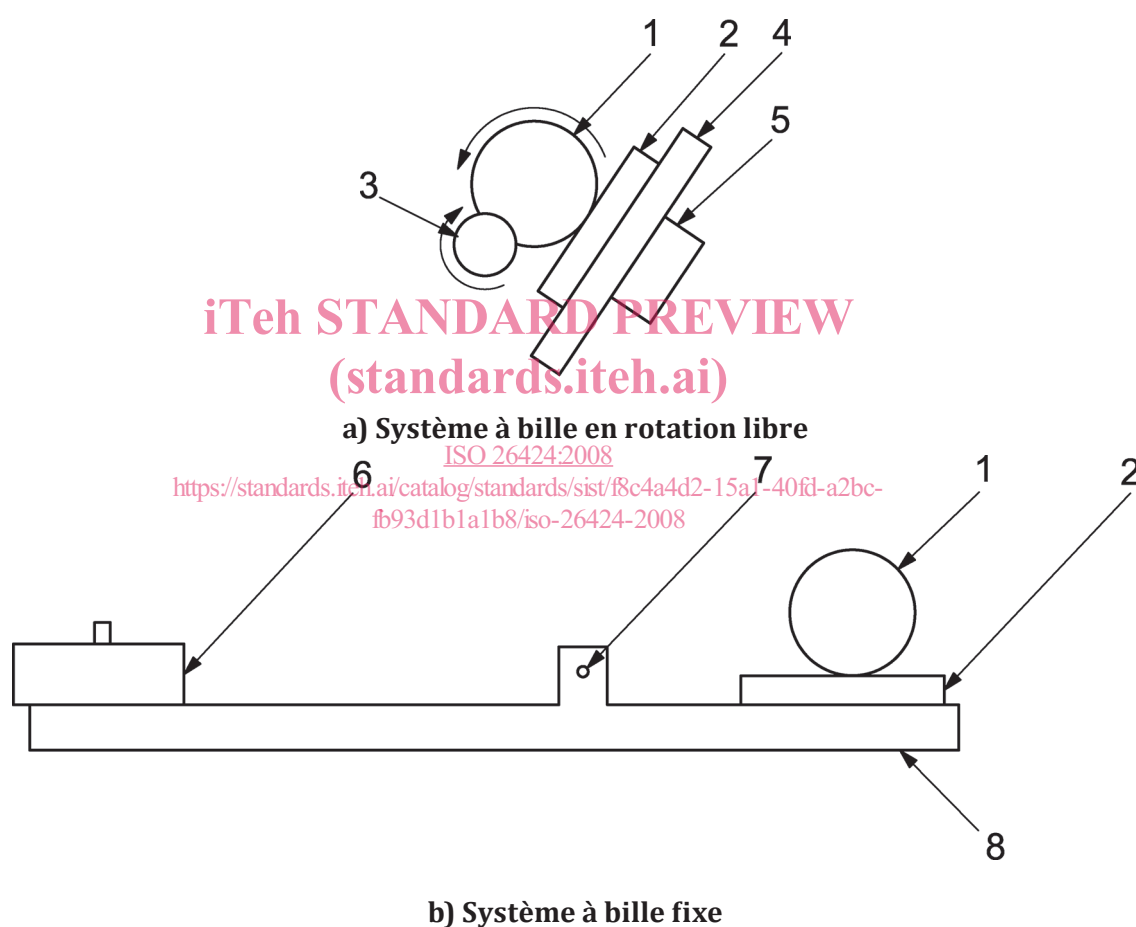
des conditions d'essai normales, puis à reproduire cette opération dans au moins cinq orientations différentes de la bille avant de commencer le programme d'essai.

NOTE 2 Une éprouvette plate en acier rectifié, d'une dureté comprise entre 200 HV30 et 800 HV 30, est considérée comme étant adaptée pour le conditionnement de la bille.

NOTE 3 Une fois le conditionnement effectué, les billes peuvent être utilisées pour produire environ 50 cratères, selon les conditions précises d'utilisation.

La performance des billes doit être vérifiée régulièrement afin de s'assurer qu'elles continuent de produire des cratères convenables. Les billes doivent être remplacées si les contrôles révèlent un comportement anormal dans la création de cratères.

NOTE 4 Ces contrôles de performance peuvent être réalisés en utilisant une éprouvette appropriée, en acier rapide trempé et revenu, ou en nitrure de titane bien caractérisé, ou encore tout autre revêtement déposé sur un matériau de substrat stable.



Légende

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1 bille | 5 cellule de charge |
| 2 éprouvette | 6 poids |
| 3 arbre d'entraînement | 7 point de pivotement |
| 4 porte-éprouvette | 8 levier |

Figure 1 — Deux différents types de système de production de cratères à l'aide d'une bille

6.3 Boue abrasive

Dans tous les cas, il faut utiliser une boue de carbure de silicium (SiC) ou de tout autre abrasif adapté mélangé à un liquide adéquat (généralement de l'eau).

L'abrasif employé habituellement est le SiC F1200, mais l'alumine F1200 ou tout autre abrasif fin peut également être utilisé. Il est préférable que la taille moyenne de l'abrasif n'excède pas 5 µm.

L'utilisation de divers abrasifs engendrera des taux d'usure différents et les résultats ne doivent pas être comparés à moins qu'ils n'aient été obtenus à partir de cratères réalisés dans des conditions identiques.

La boue utilisée doit rester homogène tout au long de l'essai. Pour ce faire, il est possible de brasser la boue en continu ou d'y ajouter des stabilisants.

Si l'essai doit être réalisé sur des revêtements déposés sur des substrats en acier sensibles à la corrosion, il est recommandé d'ajouter du nitrite de sodium (NaNO_2) à la boue à un taux de 1 g par 100 cm³ d'eau afin d'empêcher la corrosion des cratères avant leur mesurage.

La boue abrasive doit être composée de poudre abrasive et du liquide choisi dans les proportions requises.

Étant donné que le mode d'usure observé dépend fondamentalement de la concentration de la boue abrasive, il est conseillé de recourir à deux concentrations différentes, à savoir:

a) **une solution (favorise l'usure par rainurage)**

Concentration de 2 % en volume.

Pour le SiC par exemple, d'une masse volumique de 3,2 g·cm⁻³, cette concentration s'obtient en mélangeant 6,4 g de SiC dans 98 cm³ d'eau distillée ou désionisée.

b) **un concentré (favorise l'usure par roulement)**

Concentration de 20 % en volume.

Pour le SiC par exemple, d'une masse volumique de 3,2 g·cm⁻³, cette concentration s'obtient en mélangeant 80 g de SiC dans 100 cm³ d'eau distillée ou désionisée.

NOTE Le type d'usure favorisé dépend à la fois de la concentration de la boue et du type d'abrasif, ainsi que du matériau soumis à l'essai. Par exemple, il a été démontré que le rutil micrograiné (submicronique) peut favoriser l'usure par roulement, même à des concentrations aussi faibles que 3 % en volume.

Comme alternative à la préparation de boues, des boues abrasives prêtes à l'emploi peuvent être utilisées. Si ce type de suspension est employé, le fournisseur et la composition de la boue doivent être consignés.

Il est recommandé de réaliser des essais préalables afin de s'assurer que la concentration de la boue choisie produit le(s) mode(s) d'usure recherché(s) lors de l'essai.

6.4 Mesurage des dimensions du cratère

Les dimensions du cratère peuvent être mesurées à l'aide de tout équipement adapté, comme un microscope avec graticule étalonné, sous réserve que l'étalonnage utilisé puisse être relié aux étalons nationaux. Lorsque les mesurages sont effectués par capture photographique d'images, il est essentiel d'intégrer aux images des repères de plaque (référence) de dimensions connues afin de garantir l'absence de retrait de la pellicule après le développement ou au cours du stockage. Une autre solution consiste à effectuer un mesurage automatique à partir d'une capture électronique d'images, sous réserve que le système de mesurage employé soit entièrement étalonné, selon une procédure pouvant être reliée aux étalons nationaux.

NOTE Dans certains cas, par exemple l'usure par roulement avec des particules abrasives relativement grandes, il peut se révéler difficile d'identifier les bords des cratères, en particulier sur la surface externe du revêtement. Dans ces cas, l'utilisation de la profilométrie, une modification de l'angle d'éclairage ou bien l'attaque chimique du substrat (pour les cratères qui pénètrent le revêtement) peut aider.

La profilométrie peut donner des résultats différents de ceux obtenus par l'évaluation au microscope optique de la taille des cratères, en raison des bords arrondis du cratère. Il ne faut pas comparer les résultats d'essai obtenus par des méthodes de mesurage différentes.

7 Préparation des éprouvettes

7.1 Les éprouvettes revêtues doivent avoir une surface plane suffisamment grande pour pouvoir procéder aux séries d'expériences nécessaires. Dans tous les cas, l'épaisseur du revêtement doit être supérieure à 1 µm.

NOTE Les éprouvettes à surfaces non planes peuvent également être soumises à l'essai, mais l'analyse nécessaire pour déterminer le taux d'usure du revêtement et du substrat sera différente de celle indiquée dans la présente Norme internationale (voir Références [4] et [5]).

7.2 La précision avec laquelle les diamètres des cratères peuvent être mesurés dépend du fini de surface de l'éprouvette et du type d'abrasif utilisé. Même s'il est possible d'améliorer le fini de surface du revêtement avant l'essai avec un polissage, cela est en revanche impossible sur le substrat; par ailleurs, le fini de surface du substrat influe sur la précision avec laquelle l'interface entre le revêtement et le substrat peut être localisée. Par conséquent, dans la mesure du possible, il convient de déposer les revêtements sur des substrats polis afin de permettre un repérage précis de l'emplacement de la base du revêtement. Si nécessaire, la surface du revêtement peut être polie afin d'améliorer le fini de surface.

Pour éviter tout endommagement de la surface du revêtement ou toute altération de son taux d'usure, il est recommandé d'effectuer les opérations de polissage à l'aide de la plus petite meule diamant abrasive et de la pression la plus faible y correspondant pour obtenir le fini de surface souhaité. Il convient donc de commencer l'opération de polissage avec une meule diamant abrasive de 1 µm par exemple, puis d'augmenter la taille de la meule uniquement si le fini exigé ne peut pas être obtenu.

7.3 Avant d'effectuer l'essai, nettoyer l'éprouvette pour enlever toute trace de saleté. Le mode de préparation adapté est le suivant:

- a) nettoyage par ultrasons dans un solvant approprié;
- b) rinçage; <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f8c4a4d2-15a1-40fd-a2bc-fb93d1b1a1b8/iso-26424-2008>
- c) séchage dans un four à 110 °C ± 10 °C pendant 10 min.

8 Mode opératoire d'essai

8.1 Différents types d'essai

8.1.1 Type A: aucune perforation du revêtement

Dans ce type d'essai, il faut vérifier la durée de l'essai pour qu'aucune perforation du revêtement ne se produise. Il peut se révéler nécessaire de procéder à des essais préalables avant de parvenir aux conditions requises. Mesurer la taille du cratère et calculer le taux d'usure par abrasion à l'aide de la méthode décrite en [9.1](#).

8.1.2 Type B: perforation du revêtement

Dans ce type d'essai, il faut perforer le revêtement. Réaliser une série de cratères pendant des durées différentes et mesurer la taille du cratère dans chaque cas. Calculer les taux d'usure par abrasion pour le substrat et le revêtement à l'aide de la méthode décrite en [9.2](#).

Dans les essais de type B, déterminer l'épaisseur du revêtement, t , en tant que partie intégrante du mode opératoire d'essai (voir [8.3.10](#) et [Annexe A](#)).

8.2 Essai de type A: aucune perforation du revêtement

8.2.1 Dans le cas d'un système à bille en rotation libre, s'assurer que la bille et l'arbre d'entraînement sont exempts de tout dépôt de boue provenant des essais précédents. Une fois l'éprouvette solidement

fixée en place sur le système d'essai, régler la vitesse du moteur à la valeur correcte. La vitesse du moteur doit être maintenue constante tout au long de la série d'essais. La vitesse périphérique recommandée pour la bille est de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui équivaut à environ 80 tr/min pour une bille de 25 mm de diamètre.

NOTE Pour les systèmes à bille en rotation libre, la vitesse de rotation de la bille sera généralement différente de celle de l'arbre.

8.2.2 Régler le système d'essai de manière à ce que la charge entre la bille et l'éprouvette au point d'essai sur l'éprouvette soit normale et adaptée. La charge conseillée est de 0,2 N.

Si la charge appliquée à l'éprouvette est trop élevée, les bords des cratères seront mal dessinés. Pour éviter cela, il est recommandé de ne pas appliquer une charge supérieure à 0,4 N.

Dans les systèmes à bille en rotation libre, lorsque la bille est en rotation, la force normale qui agit sur l'éprouvette n'est pas, en raison du frottement, identique à celle qui s'exerce lorsque la bille est immobile (voir Référence [8]). Avec de tels systèmes, il est préférable d'utiliser une cellule de charge pour mesurer la valeur vraie de la force normale.

8.2.3 Déclencher l'alimentation en boue et la rotation de la bille et s'assurer que la bille est intégralement revêtue sur la zone de contact lors de sa première révolution complète. Le débit d'alimentation en boue doit être suffisant pour que la zone de contact entre la bille et l'éprouvette soit toujours bien humidifiée par la boue. La boue ne doit pas être réutilisée. Noter la vitesse de rotation utilisée pour la bille.

8.2.4 Enregistrer la température ambiante pendant la série d'essais. Enregistrer également l'humidité si elle est susceptible d'avoir une incidence sur la viscosité de la boue, comme dans le cas d'un liquide hygroscopique.

ITeH STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

8.2.5 Enregistrer la charge normale ainsi que toute variation durant l'essai.

ISO 26424:2008

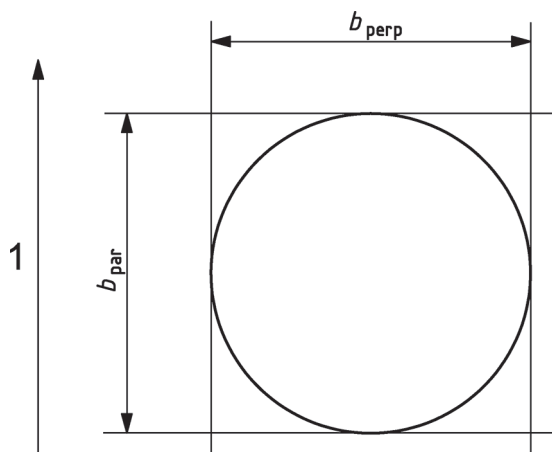
8.2.6 Interrompre l'essai (moteur et alimentation en boue) au terme de la durée prédéfinie pour l'essai.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8c4a4d2-15a1-4061-a2bc-1b93d1b1a1b8/iso-26424-2008>

NOTE Le nombre de révolutions nécessaire dépend du type de matériau en essai et des conditions d'essai; ce nombre sera déterminé lors d'essais préalables.

8.2.7 Une fois l'essai terminé, retirer l'éprouvette et la nettoyer en suivant la même procédure que celle utilisée avant l'essai (voir 7.3).

8.2.8 Mesurer le diamètre, b , du cratère parallèlement et perpendiculairement à la direction de rotation de la bille (voir Figure 2). Si b_{par} et b_{perp} diffèrent de moins de 10 %, prendre la moyenne de ces valeurs mesurées comme diamètre du cratère. Les cratères ne remplissant pas cette condition ne doivent pas servir pour le calcul des taux d'usure.



Légende

- 1 direction de rotation de la bille
- b_{perp} diamètre du cratère perpendiculairement à la direction de rotation de la bille
- b_{par} diamètre du cratère parallèlement à la direction de rotation de la bille

Figure 2 — Mesurage du cratère sans perforation du revêtement

8.2.9 Calculer le taux d'usure par abrasion du revêtement à l'aide de la méthode décrite en 9.1.

8.2.10 Soumettre chaque éprouvette à l'essai au moins trois fois.

8.3 Essai de type B: perforation du revêtement

8.3.1 Pour les appareils qui permettent de replacer la bille à l'emplacement exact du cratère après chaque mesurage du diamètre du cratère, un seul cratère, mesuré après chaque essai, peut être utilisé. Sinon, utiliser une série de cratères produits en augmentant les durées d'essai.

8.3.2 Dans le cas d'un système à bille en rotation libre, s'assurer que la bille et l'arbre d'entraînement sont exempts de tout dépôt de boue provenant des essais précédents. Une fois l'éprouvette solidement fixée en place sur le système d'essai, régler la vitesse du moteur à la valeur correcte. La vitesse du moteur doit être maintenue constante tout au long de la série d'essais. La vitesse périphérique recommandée pour la bille est de $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui équivaut à environ 80 tr/min pour une bille de 25 mm de diamètre.

NOTE Pour les systèmes à bille en rotation libre, la vitesse de rotation de la bille sera généralement différente de celle de l'arbre.

8.3.3 Régler le système d'essai de manière à ce que la charge entre la bille et l'éprouvette au point d'essai sur l'éprouvette soit normale et adaptée. La charge conseillée est de 0,2 N.

Si la charge appliquée à l'éprouvette est trop élevée, les bords des cratères seront mal dessinés. Pour éviter cela, il est recommandé de ne pas appliquer une charge supérieure à 0,4 N.

Dans les systèmes à bille en rotation libre, lorsque la bille est en rotation, la force normale qui agit sur l'éprouvette n'est pas, en raison du frottement, identique à celle qui s'exerce lorsque la bille est immobile (voir Référence [8]). Avec de tels systèmes, il est préférable d'utiliser une cellule de charge pour mesurer la valeur vraie de la force normale.

8.3.4 Déclencher l'alimentation en boue et la rotation de la bille et s'assurer que la bille est intégralement revêtue sur la zone de contact lors de sa première révolution complète. Le débit d'alimentation en boue