

## **Effet de différentes microstructures avec un même niveau de dureté sur le comportement tribologique d'un acier faiblement allié**

### **Effect of different microstructures with the same hardness level on the tribological behaviour of a low alloy steel**

**A. Jourani<sup>1\*</sup>, C. Trevisiol<sup>1</sup>, S. Bouvier<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Sorbonne Universités, Université de technologie de Compiègne, CNRS, UMR 7337 Roberval, Centre de recherche Royallieu - CS 60 319 - 60 203 Compiègne cedex, France.  
E-mail: abdeljalil.jourani@utc.fr

#### **Résumé**

Le comportement tribologique de différentes microstructures, pour une même macro-dureté (410H<sub>V</sub>), est étudié. Des microstructures martensitiques trempées et revenues et des microstructures dual-phase composées de ferrite et de martensite, pour différentes morphologies de colonies de martensite, sont élaborées à partir de l'acier faiblement allié 25CD4 par divers traitements thermiques. Des essais de frottement sont effectués entre le pion en acier traité thermiquement et un papier abrasif pour différentes rugosités. Pour toutes rugosités, les microstructures dual-phase améliorent la résistance au frottement et à l'usure. Plus particulièrement, les microstructures dual-phase présentant des colonies de martensite équiaxes et de tailles importantes minimisent le coefficient de frottement et le taux d'usure.

**Mots Clés :** Microstructure, Usure abrasive, Frottement, Taille de particule abrasive.

#### **Abstract**

The tribological behaviour of different microstructures, for a similar macro-hardness (410H<sub>V</sub>), is investigated. Quenched and tempered martensitic microstructures and ferrite-martensite dual-phase microstructures, with different martensite colony morphologies, are elaborated from the low alloy steel 25CD by various heat treatments. Friction tests are performed between this steel pin and an abrasive paper with different roughness. Whatever the roughness, it is shown that the ferrite-martensite dual-phase microstructures enhance the friction and wear resistance. More particularly, for the ferrite-martensite dual-phase specimens, the coarse and equiaxed martensite colonies minimize the friction coefficient and the wear rate.

**Keywords :** Microstructure, Abrasive wear, Friction, Abrasive particle size.

## 1. INTRODUCTION

Dans le cadre de nombreuses applications industrielles, une meilleure compréhension de l'effet de la rugosité sur le comportement au frottement et à l'usure contribue à augmenter la durée de vie des composants mécaniques et à diminuer les pertes d'énergie. Pour cela, des études visent à déterminer la rugosité optimale, caractérisée par une taille particulière de particules abrasives, qui minimise le coefficient de frottement et le taux d'usure [1-6]. Néanmoins, la prise en compte des propriétés des matériaux dans ces études manque cruellement [1-2].

La dureté correspond à la propriété des matériaux généralement utilisée pour contrôler le comportement tribologique [8-9]. Comme décrit par la loi d'Archard, le taux d'usure diminue à mesure que la dureté augmente. Néanmoins, la composition chimique et la microstructure jouent également des rôles importants [4-7]. En raison d'une dureté élevée, les aciers martensitiques présentent une meilleure résistance à l'usure que les aciers bainitiques, perlitiques et ferritiques. Cependant, cette dureté élevée s'accompagne également d'une haute fragilité pouvant être pénalisante pour les applications ciblées. Ainsi, il y a un réel enjeu à trouver des structures moins fragiles en développant des microstructures présentant de meilleures combinaisons entre ténacité et ductilité. Par exemple, des microstructures de type dual-phase, avec de la ferrite ductile et de la martensite dure [7], et des microstructures revenues présentent des propriétés mécaniques intéressantes.

Dans la littérature, les comportements tribologiques de différentes microstructures sont étudiés mais uniquement en se focalisant sur l'usure, au travers du taux d'usure, et sans fixer la dureté et/ ou la composition chimique. La première originalité de cet article est d'étudier l'effet des microstructures avec le même niveau de dureté et la même composition chimique sur le comportement au frottement et les mécanismes d'usure d'un acier faiblement allié. La deuxième originalité consiste à étudier les effets combinés de la microstructure et de la rugosité sur le comportement tribologique de cet acier.

## 2. MATERIAU ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Cette étude vise à investiguer le comportement tribologique de l'acier faiblement allié 25CD4. Le tableau 1 présente la composition chimique de cet acier. Pour cela, cinq pions cylindriques, de 10mm de diamètre et de longueur, ont été usinés à partir d'une tige de cet acier.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.22-0.29	≤0.40	0.40-0.90	≤0.035	≤0.035	0.9-1.20	0.15-0.30

**Tab. 1** Composition chimique de l'acier 25CD4

Ces pions subissent différents traitements thermiques afin de générer diverses microstructures composées de trois microstructures de type dual-phase (DP1, DP2 et DP3) contenant de la martensite et de la ferrite, une microstructure martensitique trempée (MT) et une microstructure martensitique revenue (MR).

En premier lieu, les microstructures dual-phase sont obtenues en utilisant trois différents cycles de traitements thermiques dans le but de faire varier la morphologie des colonies de martensite. La première microstructure dual-phase DP1 est obtenue suite à une austénitisation (à 900°C pendant 30 minutes) suivie par un recuit intercritique (à 725°C pendant 3 minutes) refroidi brutalement lors d'une trempe à l'eau. La deuxième microstructure dual-phase DP2 est obtenue suite à une austénitisation (à 900°C pendant 30 minutes) suivie par un refroidissement lent. Puis, le pion subit un recuit intercritique (à 790°C pendant 17 minutes) s'achevant par un refroidissement brutal lors d'une trempe à l'eau. La troisième microstructure dual-phase DP3 est obtenue suite à une austénitisation (à 900°C pendant 30 minutes) refroidie brutalement lors d'une trempe à l'eau. Puis, le pion subit un recuit intercritique (à 790°C pendant 12 minutes 30) s'achevant par un refroidissement brutal lors d'une trempe à l'eau.

En second lieu, l'obtention de la microstructure martensitique trempée MT se fait à partir d'un traitement thermique s'initiant par une austénitisation (à 1100°C pendant 2 heures) suivie par une trempe à l'eau.

En dernier lieu, l'obtention de la microstructure martensitique revenue MR se fait à partir d'un traitement thermique s'initiant par une austénitisation (à 900°C pendant 30 minutes) suivie par une trempe d'eau puis un revenu (à 400°C pendant 2 heures).

Des essais de frottement à sec sont effectués entre le pion en acier et un papier abrasif selon une configuration pion-plan et un mouvement rectiligne alternatif à température ambiante (23 ° C) dans l'air pour une humidité relative de 50 à 60%. Ainsi, le tribomètre Plint TE77, dont le descriptif est mentionné dans l'étude de Trevisiol et al. [6], est utilisé. Les papiers abrasifs utilisés sont constitués de particules abrasives de carbures de silicium (SiC) pour des tailles de 15 µm, 35 µm et 200 µm. La variation de la taille de particules abrasives permet d'étudier l'effet de rugosité sur le comportement au frottement et à l'usure des pions traités thermiquement. Ces essais de frottement sont effectués pour un chargement de 50N, une vitesse linéaire de 0,06 m/s et une fréquence de 2 Hz. La distance totale parcourue est de 18m pour une longueur de course de 15mm.

Pour chaque configuration, trois essais de frottement sont réalisés à partir desquels les valeurs moyennes de coefficients de frottement et de taux d'usure sont déterminées. D'une part, le coefficient de frottement est calculé pour l'état stationnaire de l'essai. D'autre part, après avoir nettoyé aux ultrasons les pions en acier traités thermiquement avec de l'éthanol pendant 10 min, les masses des pions sont mesurées avant et après chaque essai de frottement. Puis, le taux d'usure est calculé à partir de ces pertes de masse mesurées en utilisant une balance de lecture directe (avec une échelle minimale de 0,1 mg). Le taux d'usure est calculé comme le rapport entre le volume perdu cumulatif et la distance totale parcourue estimée à 18m.

Les microstructures initiales, les surfaces usées des pions en acier et des papiers abrasifs sont également analysées. Ainsi, un Microscope Electronique à Balayage MEB-FEG Zeiss Sigma<sup>TM</sup> est utilisé à 15kV pour les microstructures initiales et les surfaces usées des pions en acier et à 2kV pour les surfaces usées des papiers abrasifs. Pour les microstructures de type dual-phase, composée de ferrite et de martensite, les fractions volumiques de martensite sont déterminées par traitement d'image à l'aide du logiciel ImageJ à partir de dix micrographies. Pour une charge de 10kg, un indenteur de type vickers est utilisé pour caractériser la macro-dureté de chaque microstructure. Les mesures sont réalisées sur 10 différents emplacements et sont moyennées.

### **3. ELABORATION DES MICROSTRUCTURES PAR TRAITEMENTS THERMIQUES**

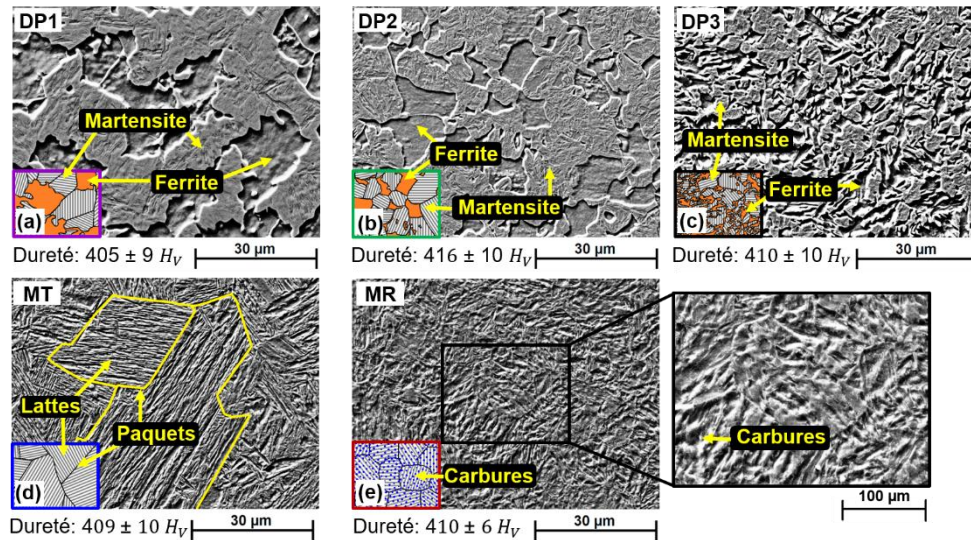
La figure 1 présente les micrographies des microstructures générées. Ces cinq microstructures présentent des macro-duretés assez similaires autour de  $410H_v \pm 5$ .

Les microstructures dual-phase, composées de ferrite et de martensite, se caractérisent par diverses morphologies de colonies de martensite dépendant de la microstructure précédant le recuit intercritique [4,7;12-14]. Concernant la première microstructure dual-phase DP1 (figure 1a), les traitements thermiques d'austénitisation suivie d'un recuit intercritique à 725°C conduisent à la nucléation et à la croissance de la ferrite aux joints des anciens grains d'austénite. Ensuite, la trempe à l'eau entraîne la transformation de l'austénite inchangée en martensite. La microstructure finale présente des colonies de martensite équiaxes et de tailles importantes entourées de ferrite. Concernant la deuxième microstructure dual-phase DP2 (figure 1b), les traitements thermiques d'austénitisation suivie d'un refroidissement lent conduisent à la formation d'une microstructure composée de ferrite hypo-eutectoïde et de perlite. Ensuite, lors du recuit intercritique à 790°C, la nucléation de l'austénite s'effectue aux interfaces entre la ferrite et les carbures au sein des colonies de perlite. À mesure que les carbures se dissolvent, l'austénite croît dans ces carbures. Après la trempe à l'eau finale, la microstructure résultante présente des colonies de martensite équiaxes réparties le long des joints de grains de la ferrite. Dans ce cas, les colonies de martensite sont plus petites que pour la première microstructure dual-phase DP1. Concernant la troisième microstructure dual-phase DP3 (figure 1c), les traitements thermiques d'austénitisation suivie d'une trempe à l'eau conduisent à une microstructure martensitique. Ensuite, lors du recuit intercritique à 790°C, la nucléation et la croissance de l'austénite et de la ferrite aux joints des anciens grains d'austénite et des lattes de martensite s'effectuent. Après la trempe à l'eau finale, la microstructure résultante présente des colonies de martensite fines et fibreuses au sien d'une

matrice ferritique. Enfin, les fractions volumiques de martensite des microstructures dual-phase DP1, DP2 et DP3 sont assez similaires et sont respectivement de  $67\pm 2\%$ ,  $69\pm 3\%$  et  $65\pm 3\%$ .

La microstructure martensitique trempée MT (figure 1d) se caractérise par des lattes de martensite regroupées en paquets. En effet, après une austénitisation suivie d'une trempe à l'eau, la microstructure austénitique se transforme en une microstructure composée de martensite et d'une faible teneur en austénite résiduelle.

La microstructure martensitique revenue MR (figure 1d) présente des lattes de martensite, appauvries en carbone, et des carbures fins [10]. En outre, à mesure que la température et le temps d'austénitisation augmentent, la taille des grains d'austénite augmente [11]. Ainsi, la microstructure martensitique revenue MR présente des tailles des anciens grains d'austénite plus faibles que celles de la microstructure martensitique trempée MT.

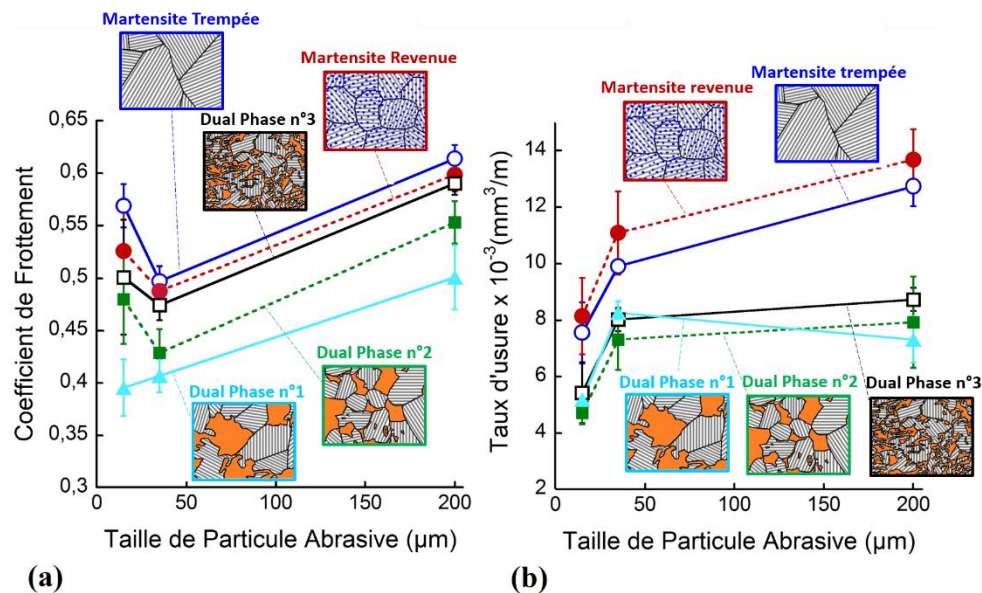


**Fig. 1 :** Micrographies et représentations schématisques des microstructures (a) DP1, (b) DP2, (c) DP3, (d) MT et (e) MR

#### 4. RESULTATS

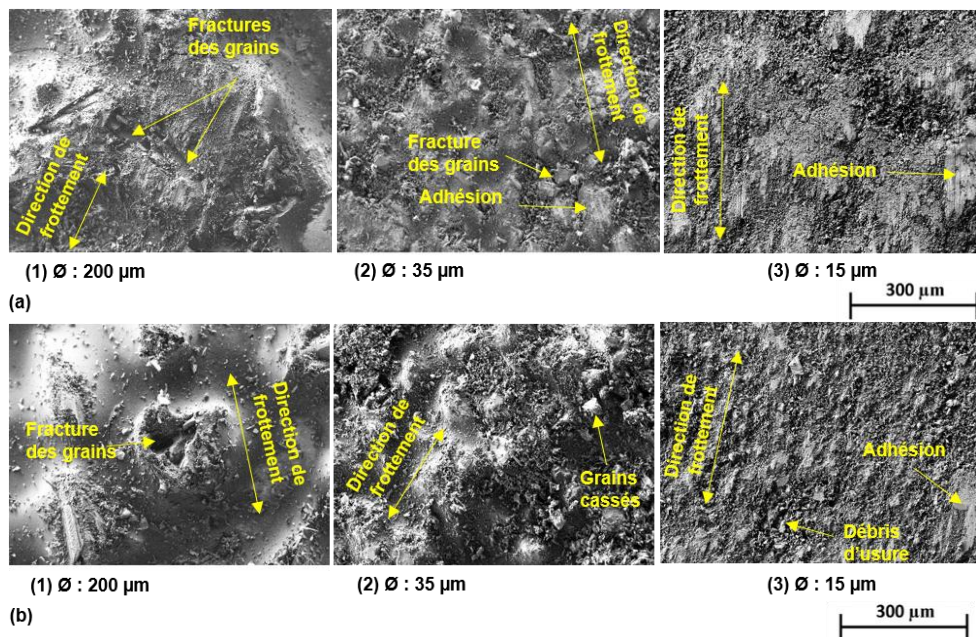
Pour les différentes microstructures, la figure 2 montre l'évolution du coefficient de frottement et du taux d'usure en fonction de la taille de particules abrasives. Il est montré qu'une taille intermédiaire de particules abrasives d'environ  $35\text{ }\mu\text{m}$  minimise le coefficient de frottement. Néanmoins, le coefficient de frottement de la microstructure dual-phase DP1 est minimisé par la plus petite taille de particules abrasives de  $15\text{ }\mu\text{m}$ . Le taux d'usure, quant à lui, est minimisé par la plus petite taille de particules abrasives de  $15\text{ }\mu\text{m}$  pour toutes microstructures. Puis, le taux d'usure augmente avec la taille de particules abrasives. De plus, par rapport à la microstructure martensitique trempée MT et à la microstructure martensitique revenue MR, les microstructures dual-phase minimisent le coefficient de frottement et le taux d'usure.





**Fig. 2 :** Evolution du (a) coefficient de frottement et du (b) taux d'usure en fonction de la taille de particules abrasives

Pour analyser l'effet des microstructures et de la taille de particules abrasives, la figure 3 montre les observations MEB des surfaces usées des papiers abrasifs pour des tailles de particules abrasives de 200 μm, de 35 μm et 15 μm pour la microstructure martensite trempée MT et la microstructure dual-phase DP1.



**Fig. 3 :** Micrographies des surfaces usées des papiers abrasifs pour différentes tailles de particules abrasives Ø dans le cas de la (a) microstructure martensitique trempée MT et de la (b) microstructure dual phase DP1

## 5. DISCUSSIONS

La figure 4 montre une représentation schématique des conclusions obtenues sur l'effet des microstructures sur le comportement au frottement et à l'usure en fonction des tailles de particules abrasives.

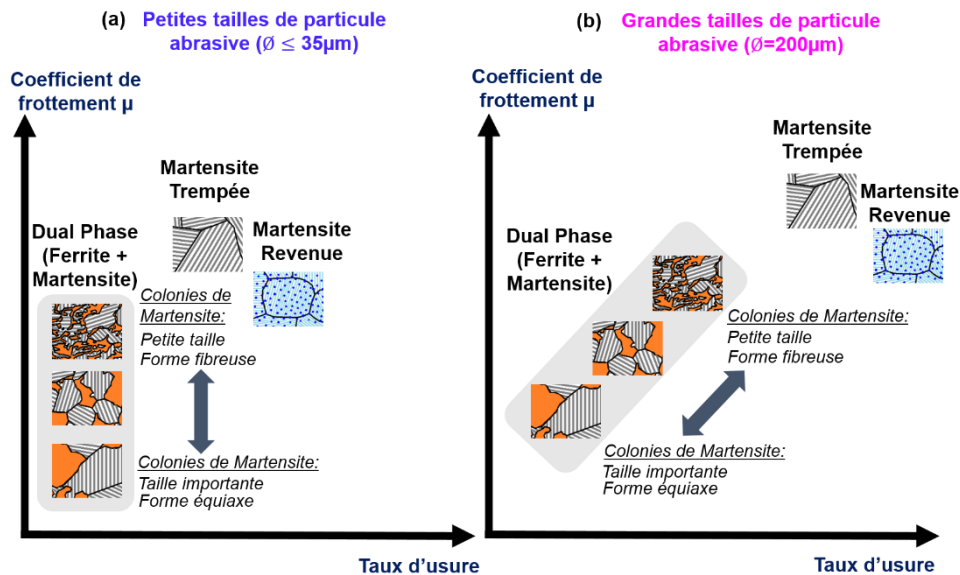
Concernant les microstructures dual-phase, la martensite, plus riche en carbone et plus dure que celles de la microstructure martensitique revenue MR et de la microstructure martensitique trempée MR [7;15-18], contribue à minimiser le coefficient de frottement et le taux d'usure. Cette tendance est valable pour toutes tailles de particules abrasives. Par conséquent, la martensite des microstructures dual-phase supporte une pression plus élevée et présente des profondeurs de pénétration des grains abrasifs et des déformations plastiques plus faibles que pour les deux autres microstructures étudiées. Pour les particules abrasives de tailles importantes, les observations MEB révèlent principalement des mécanismes d'usure de coupe pour la microstructure dual-phase DP1. Dans le cas de la microstructure martensitique trempée MT, la surface usée du papier abrasif révèle également des mécanismes d'usure de coupe ainsi que de l'adhésion des débris d'usure sur les sommets des particules abrasives, ce qui entraîne une augmentation de la surface de contact et du coefficient de frottement [1;4].

Concernant les microstructures dual-phase, comparées aux colonies de martensite fines et fibreuses (DP3), les colonies de martensite équiaxes et de tailles importantes (DP1) minimisent le coefficient de frottement. Les colonies de martensite équiaxes et de tailles importantes (DP1), en supportant la majorité de la charge, sont moins déformées plastiquement que les colonies de martensite fines et fibreuses [7]. De plus, l'effet des morphologies des colonies de martensite sur le taux d'usure augmente avec la taille de particules abrasives. Pour des particules abrasives de petites tailles de 15 et 35  $\mu\text{m}$ , ce dernier effet est négligeable. En revanche, pour des particules abrasives de tailles importantes de 200  $\mu\text{m}$ , l'effet des morphologies des colonies de martensite sur le taux d'usure tend à suivre la même tendance que le coefficient de frottement. Ainsi, les colonies de martensite équiaxes et de tailles importantes (DP1) améliorent à la fois le comportement au frottement et à l'usure.

Concernant les deux autres microstructures, la microstructure martensitique revenue MR présente un taux d'usure supérieur et un coefficient de frottement inférieur à celui de la microstructure martensitique trempée MT. Ainsi, dans le cas microstructure martensitique revenue MR par rapport à la microstructure martensitique trempée MT, la présence de carbures, de lattes martensitiques appauvries en carbone et de plus petits anciens grains d'austénite contribuent à diminuer le coefficient de frottement et à augmenter le taux d'usure.

Des précédents travaux [1; 4] ont montré que la minimisation du coefficient de frottement pour une taille optimale de particules abrasives est due à la transition entre des mécanismes d'usure adhésifs et abrasifs. En effet, pour des particules abrasives de tailles importantes, une prédominance des mécanismes d'usure abrasifs, caractérisé par des fractures des particules abrasives, conduit à la hausse du coefficient de frottement [1-2;4]. Pour des petites particules abrasives, les débris d'usure d'acier s'accumulent autour des particules abrasives produisant de l'adhérence [12] et une hausse du coefficient de frottement. Néanmoins, il en ressort que la taille optimale de particules abrasives dépend de la microstructure. En effet, pour la microstructure dual-phase DP1, le coefficient de frottement est minimisé pour une taille de particules abrasives de 15  $\mu\text{m}$ . En revanche, les quatre autres microstructures présentent un coefficient de frottement minimisé pour une taille supérieure de particules abrasives de 35  $\mu\text{m}$ . Ainsi, la transition entre des mécanismes d'usure abrasifs et adhésifs est étroitement liée à la taille de particules abrasives mais également à la microstructure.

En revanche, avec l'augmentation de la taille de particules abrasives, la hausse du taux d'usure s'associe à une prédominance des mécanismes d'usure de coupe et une augmentation du nombre des débris d'usure. Comme énoncé dans des précédents travaux [19-22], à mesure que la taille de particules abrasives augmente jusqu'à une taille critique, le taux d'usure augmente puis se stabilise. Ainsi, les microstructures dual-phase présentent une taille critique aux alentours de 35  $\mu\text{m}$ . En revanche, la microstructure martensitique trempée MT et la microstructure martensitique revenue MR présentent des valeurs de tailles critiques supérieures à celle des microstructures dual-phase. Ainsi, la microstructure impacte la taille critique de particules abrasives.



**Fig. 4 :** Représentation schématique du comportement au frottement et à l'usure de différentes microstructures dans le cas de (a) petites et de (b) grandes tailles de particules abrasives

## 6. CONCLUSIONS

Pour un même niveau de dureté (d'environ  $410H_v$ ) et une même composition chimique, diverses microstructures sont générées à partir de différents traitements thermiques. L'objectif principal est d'analyser les effets combinés de la taille de particules abrasives et de la microstructure sur les comportements au frottement et à l'usure. Par conséquent, des essais de frottement à sec sont effectués entre ces pions traités thermiquement contre un papier abrasif pour différentes tailles de particules abrasives. L'effet de la rugosité sur le comportement tribologique en utilisant différentes tailles de particules abrasives est ainsi étudié. Les principaux résultats sont les suivants:

- Comparées à une microstructure martensitique trempée et à une microstructure martensitique revenue pour toutes tailles de particules abrasives, les microstructures dual-phase composées de ferrite et de martensite minimisent le coefficient de frottement et le taux d'usure.
- Concernant les microstructures dual-phase et pour toutes tailles de particules abrasives, les morphologies des colonies de martensite influencent le comportement au frottement et à l'usure. En effet, les colonies de martensite équiaxes et de tailles importantes minimisent le coefficient de frottement et le taux d'usure. En revanche, les colonies de martensite fines et fibreuses détériorent le comportement au frottement et à l'usure.
- Généré par une transition des mécanismes d'usure entre l'abrasion et l'adhésion, le coefficient de frottement est minimisé pour une taille optimale de particules abrasives. Néanmoins, la microstructure impacte cette taille optimale de particules abrasives entraînant des évolutions différentes de coefficient de frottement.
- Le taux d'usure augmente avec la taille et l'angle d'attaque des particules abrasives jusqu'à se stabiliser à partir d'une taille critique de particules abrasives. Néanmoins, les microstructures dual-phase minimisent cette taille critique de particules abrasives.

## 7. REFERENCES

- [1] Jourani A., Bouvier S., « Friction and wear mechanisms of 316L stainless steel in dry sliding contact: effect of abrasive particle size », *Tribol Trans*, 58 (1) (2015) 131–139.
- [2] Jourani A., Hagege B., Bouvier B., Bigerelle M., Zahouani H., « Influence of abrasive grain geometry on friction coefficient and wear rate in belt finishing », *Tribol. Int.*, 59 (2013) 30–37.
- [3] Coronado J.J., Rodríguez S.A., Sinatora A., « Effect of particle hardness on mild–severe wear transition of hard second phase materials », *Wear*, 301 (2013) 82–88.

- [4] Trevisiol C., Jourani A., Bouvier S., « Effect of martensite volume fraction and abrasive particles size on friction and wear behaviour of a low alloy steel », *Tribol. Int.*, 113 (2017) 411–425.
- [5] Zum Gahr K.-H., *Microstructure and Wear of Material*, Tribology Series, Vol. 10, Elsevier, Amsterdam, 1987.
- [6] Trevisiol C., Jourani A., Bouvier S., « Effect of hardness, microstructure, normal load and abrasive size on friction and on wear behaviour of 35NCD16 steel », *Wear*, (2017) In press.
- [7] Xu X., Van der Zwaag S., W. Xu., « The effect of ferrite-martensite morphology on the scratch and abrasive wear behaviour of a dual phase construction steel », *Wear*, 348–349 (2016) 148–157.
- [8] Hokkirigawa K., Kato K., Li Z. Z., « The effect of hardness on the transition of the abrasive wear mechanism of steels », *Wear*, 123, 1988, 241–251.
- [9] Khrushchov M M., « Principles of abrasive wear », *Wear*, 28 (1974) 69–88.
- [10] Prawoto Y., Jasmawati N., Sumeru K., « Effect of Prior Austenite Grain Size on the Morphology and Mechanical Properties of Martensite in Medium Carbon Steel », *J. Mater. Sci. Technol.*, 28 (5) (2012) 461–466.
- [11] Speich G. R., Leslie W. C., « Tempering of steel », *Metall. Trans.*, 3 (5) (1972) 1043–1054.
- [12] De Pellegrin D. V., Torrance A. A., Haran E., « Wear mechanisms and scale effects in two-body abrasion », *Wear*, 266 (2009) 13–20.
- [13] Kim N. J., Thomas G., « Effects of morphology on the mechanical behavior of a dual phase Fe/2Si/0.1 C steel. », *Metall. Trans. A*, 12 (3) (1981) 483–489.
- [14] Bhowmick S., Show B. K., « Effect of prior heat treatment on wear behaviour of 0.23% carbon dual phase steel », *Can. Metall. Q.*, 53(1) (2014) 93–99.
- [15] Movahed P., Kolahgar S., Marashi S.P.H., Pouranvari M., Parvin N., « The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets », *Mater Sci Eng A*, 518 (2009) 1–6.
- [16] Calcagnotto M., Adachi Y., Ponge D., Raabe D., « Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging », *Acta Mater*, 59 (2011) 658–670.
- [17] Modi O.P., Pandit P., Mondal D.P., Prasad B.K., Yegneswaran A.H., Chrysanthou A., « High-stress abrasive wear response of 0.2% carbon dual phase steel: effects of microstructural features and experimental conditions », *Mater Sci Eng A*, 458 (2007) 303–311.
- [18] Tyagi R., Nath S.K., Ray S., « Effect of martensite content on friction and oxidative wear behavior of 0.42 Pct carbon dual-phase steel », *Metall Mater Trans A*, 33 (2002) 3479–3488.
- [19] Gählin R., Jacobson S., « The particle size effect in abrasion studied by controlled abrasive surfaces », *Wear*, 224(1) (1999) 118–125.
- [20] Misra A., Finnie I., « On the size effect in abrasive and erosive wear », *Wear*, 65 (1981) 359–373.
- [21] Rabinowicz E., Mutis A., « Effect of abrasive particle size on wear », *Wear*, 8 (1965) 381–390.
- [22] Coronado J.J., Sinatora A., « Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology an