

Etude de l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fatigue d'un acier XC48

GACEB Mohamed * et BRAHMI Sadek **

* *Laboratoire de Fiabilité des Equipements Pétroliers et matériaux, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Algeria.*

*E-mail : gaceb_m@yahoo.fr

** E-mail : sadek_br@yahoo.fr

Résumé :

On parle communément de la durabilité d'un matériau comme s'il s'agissait d'une propriété fondamentale définie comme la période de temps pendant laquelle le matériau accomplira une fonction utile. La vie utile d'un matériau en service dépend cependant toujours non seulement de la combinaison des facteurs de charge et d'environnement auxquels il est soumis mais aussi des facteurs d'intégrité dont l'état de surface constitue un facteur très important, et c'est ainsi qu'il faut toujours tenir compte des paramètres d'état des surfaces dès la mise en service lorsque l'on considère la durabilité, ou vie du matériau en service.

Cette dépendance est encore plus ressentie dans le cas des matériaux utilisés dans la confection de composants sollicités à la fatigue. Que ce soit en fatigue mécanique ou en fatigue de contact, les gradients de propriété au voisinage de la surface (microstructure, écrouissage, contraintes résiduelles) et les imperfections superficielles apportées par les procédés de fabrication jouent un rôle primordial sur la tenue à la fatigue en service du composant.

La présente étude vise à établir l'influence des paramètres de surfaces réalisées par tournage sur la résistance à la fatigue d'un acier XC 48, en s'attachant plus particulièrement à identifier l'effet de la rugosité qui peut être produite sous différentes conditions d'usinage des surfaces. Pour ce faire, diverses éprouvettes, présentant des combinaisons variées d'état de surfaces, réalisées par tournage à différents paramètres de coupe ont été soumises à des essais de flexion rotative et l'effet sur la durée de vie et la limite de fatigue, pour divers conditions de chargement, a été évalué.

Abstract :

We commonly talk about the durability of a material as if it were a fundamental property defined as the time period during which the material will accomplish a useful function. The life time of a material in service depends however, always not only on the combination of load and environment factors to which it is subjected, but also on integrity factors such as the surface state which constitutes a very important factor, and this is why one should always take into account the surface state parameters as soon as a component is put into service when we consider the durability or life of a material in service.

This dependence is even more felt in the case of materials used in the making of components subjected to fatigue loading. Whether it is mechanical fatigue or contact fatigue, the properties' gradient in the immediate vicinity of the surface (microstructure, strain hardening, residual stresses) and the superficial imperfections produced about by the manufacturing processes play a primordial role in the fatigue resistance of the component.

The present study aims to establish the influence on the fatigue resistance, of the parameters of surfaces obtained by turning an XC48 steel, while paying tribute particularly to identify the effect of roughness which can be produced under various cutting conditions of the surfaces. For this to be achieved, various specimens with different surface state combinations obtained by turning at different cutting parameters have been subjected to rotary flexion tests and the effect on the life period and the fatigue limit, for various loading conditions, has been evaluated.

Mots-clefs: Intégrité de surface; fatigue;

1 Introduction :

Les pièces mécaniques produites par les différents procédés présentent des nuances distinctes dans l'état de leurs surfaces. Ces différences rendent les surfaces obtenues par les différents procédés faciles à être identifiées. Grâce à son caractère unique, l'état de surface obtenu par un procédé quelconque peut être d'ores et déjà comparé à d'autres surfaces obtenues par le même procédé à travers des moyens simples tels que la mesure de la taille moyenne de ses irrégularités en utilisant les normes en vigueur et les techniques modernes de mesure.

Les processus de formation de copeau consistent à enlever de la pièce la matière sous forme de copeau, pour former une nouvelle surface. Ces processus produisent des surfaces de nature différente de celle du métal de base. Plusieurs travaux [1-6] ont étudié l'influence des opérations d'usinage sur la surface des pièces de différents matériaux.

Le phénomène est occasionné par la formation de trois zones de déformation plastique: la zone primaire selon le plan de cisaillement des copeaux, la zone secondaire entre le copeau et la face d'attaque de l'outil et la zone tertiaire entre la face en dépouille de l'outil et la nouvelle surface usinée. La nouvelle surface usinée demeure aussi déformée à une certaine profondeur. Dans certaines conditions il y a formation d'une arête de coupe rapportée à un caractère instable laissant occasionnellement des débris sur la surface et affectant ainsi l'état de surface.

Les zones de déformation dans le processus de coupe sont d'importance majeure pour les propriétés de la nouvelle surface usinée. Ces zones sont affectées par plusieurs facteurs tels que les conditions de coupe, les caractéristiques géométriques de l'outil, le coefficient de frottement à l'interface copeau/face d'attaque de l'outil et les matériaux de l'ébauche et de l'outil.

L'impact principal sur les surfaces usinées est mécanique, thermique et chimique. A cause des efforts appliqués par l'outil sur le matériau, ce dernier est déformé plastiquement, cette déformation est anisotrope et visuelle aux microscopes. L'impact thermique peut conduire à deux phénomènes, qui sont les transformations plastiques avec ou sans modifications structurales ou métallographiques [7].

Les transformations plastiques sans modifications structurales résultent de la distribution non homogène de la température entraînant des contraintes thermiques compressives, qui peuvent dépasser la charge maximale et conduisent à des déformations plastiques dans la couche superficielle. Ce type d'impact sur la surface peut être mis en évidence par la mesure des contraintes résiduelles où la texture et la dureté ne sont pas changées [7]. Les transformations structurales thermiques, telles que les transformations martensitiques et la recristallisation, peuvent être détectées par les méthodes métallographiques dont le polissage, l'attaque chimique et la visualisation par microscope.

Les principales altérations dans la couche superficielle [1, 4, 8-10] concernent la texture de la surface (rugosité et défauts de surface), le changement de la dureté superficielle (micro dureté), la distribution des contraintes résiduelles, la déformation plastique et les transformations de phase.

Les causes principales de toutes ces altérations sont [4] les hautes températures ainsi que les grands gradients de température, la déformation plastique ainsi que les réactions chimiques et l'absorption chimique dans la nouvelle surface.

Le contexte général de cette étude est la fabrication et la spécification des surfaces de pièces mécaniques soumises à des sollicitations de fatigue. Cette étude présente les résultats d'essais de fatigue réalisés sur des éprouvettes en acier XC 48 obtenues en tournage. Pour caractériser les états des surfaces obtenues, la rugosité est retenue comme paramètre géométrique.

Ce paramètre peut être varié indépendamment dans un domaine restreint, par un choix judicieux des conditions d'usinage. Le tour permet de réaliser des éprouvettes cylindriques destinées à explorer la fatigue en flexion rotative.

Les propriétés fonctionnelles en fatigue des pièces usinées sont très sensibles aux caractéristiques de leur surfaces et de leur couche superficielle influencée [1,11], car les fissures s'initient généralement dans cette couche [2]. Les paramètres de la qualité de surface,

notamment la rugosité et les défauts de la surface, la microstructure et les propriétés physico mécaniques de la couche superficielle influencée, déterminent principalement l'amorçage et le début de la propagation des fissures. Le choix des paramètres de coupe et de l'état métallurgique du matériau lors de l'usinage est par conséquent important, vue qu'il détermine le processus de formation de copeau déterminant la qualité de la surface.

L'influence de la rugosité des surfaces sur le comportement en fatigue des pièces usinées est bien établie [12,13]. Il y'a cependant désagrément concernant le caractère de cette influence et l'hypothèse qui prédit que les surfaces les moins rugueuses donnent les meilleures résistance à la fatigue n'est pas toujours démontrée. Ce qui laisse à penser que d'autres paramètres d'état de surface devraient être considérés.

2 Procédures expérimentales

Le matériau étudié est un acier XC 48 est fourni sous forme de barres cylindriques laminées de 14 mm et 20 mm de diamètre. Cet acier comme tous les aciers à moyen carbone s'emploie dans la construction mécanique après normalisation, amélioration et trempe superficielle, pour une variété de pièces (vilebrequins, bielles, arbre à cames, pignons,...). Dans l'état normalisé, l'acier XC48 possède une grande résistance par rapport aux aciers de faible carbone mais sa ductilité est plus faible.

Les essais de fatigue sont effectués sur des éprouvettes cylindriques normalisées de 8 mm diamètre et de 146 mm de longueur (figure 2). Les essais de fatigue sur éprouvettes cylindriques sont réalisés en flexion rotative sous air, à la température ambiante en utilisant une machine d'essai en fatigue modèle Gunt WP140 avec une vitesse de rotation d'approximativement 2800 tr/min. Tous les essais ayant dépassé 5×10^6 cycles sans rupture d'éprouvettes ont été interrompus.

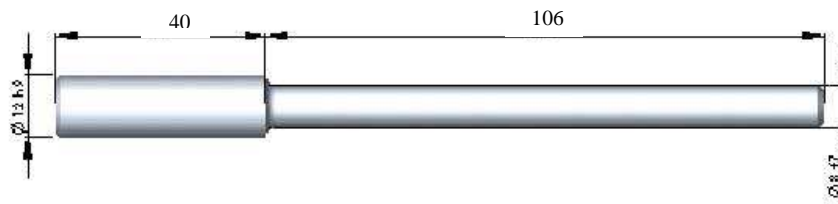


FIG. 2 - Géométrie de l'éprouvette usinée pour les tests de fatigue.

Etant donnée l'influence d'un grand nombre de paramètres sur chaque résultat, il nous a fallu définir un planning d'expériences où chaque paramètre variait d'une façon indépendante des autres. Notre observation a porté sur la rugosité et la micrographie de la surface usinée. Pour déterminer les limites du domaine d'usage du couple outil/matière, il s'agit de déterminer un domaine de validité de production d'une surface dans de bonnes conditions technologiques en fonction de deux paramètres : la vitesse de coupe (V_c) et de l'avance (f).

Le tournage a été réalisé utilisant des outils en carbure grade P20 sur un tour universel TOKAPHO-CTAHOK TB-320n avec une vitesse de rotation maximale de 2000 tr/min. Dans un premier temps la vitesse de coupe qui est un paramètre déterminant du point de vue de son influence sur l'état de surface, a été choisie de manière à obtenir divers états de surface. Lors de cette opération, aucune lubrification n'est effectuée. Pour une meilleure reproductibilité, une pastille neuve est installée sur le porte-outil pour la réalisation des deux dernières passes de finition de chaque éprouvette.

La rugosité des surfaces obtenues après usinage avec les conditions mentionnées ci-dessus, est mesurée sur les surfaces des éprouvettes au moyen d'un mesureur d'état de surface électronique à palpeur en diamant à capteur inductif du type SURFTEST SJ301. La mesure a été faite dans la direction normale à la direction de la coupe. Les valeurs des rugosités sont déterminées à partir de moyen de quatre mesures à des endroits arbitrairement choisis. Le paramètre R_a est utilisé pour caractériser la rugosité.

3 Résultats et discussion

3.1 Effets des paramètres de coupe sur la rugosité de surface

Les figures 3 et 4 montrent la variation de la rugosité moyenne en fonction de deux paramètres de coupe; la vitesse de coupe et l'avance par tour respectivement.

Il apparaît (fig.3) que l'usinage de l'acier à vitesses réduites ou à des vitesses élevées maintient Ra à des valeurs faibles. Entre ces deux extrêmes la rugosité atteint une valeur maximale avec une forte variabilité à une vitesse traditionnellement associée avec la formation de l'arête rapportée [14]. La fourchette des vitesses de coupe utilisées peut être divisée principalement en trois paliers. Un palier à basses vitesses sans formation d'arête rapportée, un palier de vitesses de coupe moyennes avec formation de l'arête rapportée et finalement un palier à vitesses élevées pour lesquelles l'arête rapportée disparaît complètement.

Plusieurs méthodes ont été rapportées pour la détermination des conditions dans lesquelles l'arête rapportée est formée. La méthode des abaques empiriques de Trent [15] n'en est qu'un exemple. Oxley [16] a exploré comment la théorie de l'usinage pourrait être utilisée pour estimer le régime de formation de l'arête rapportée. Son approche est basée sur le raisonnement suggéré par Shaw [17] utilisant la température comme critère de formation d'arête rapportée.

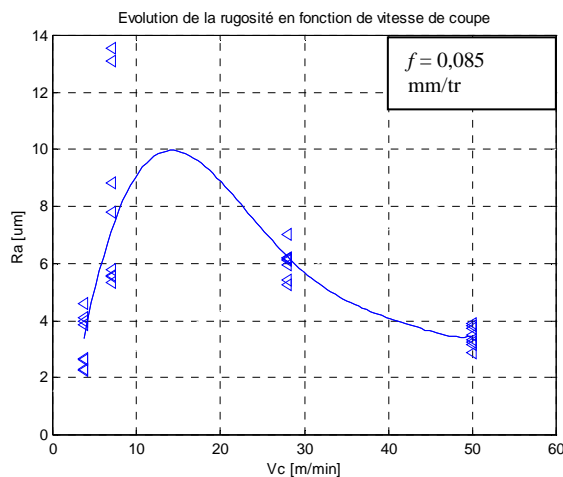


FIG. 3 - Variation de la rugosité avec la vitesse coupe.

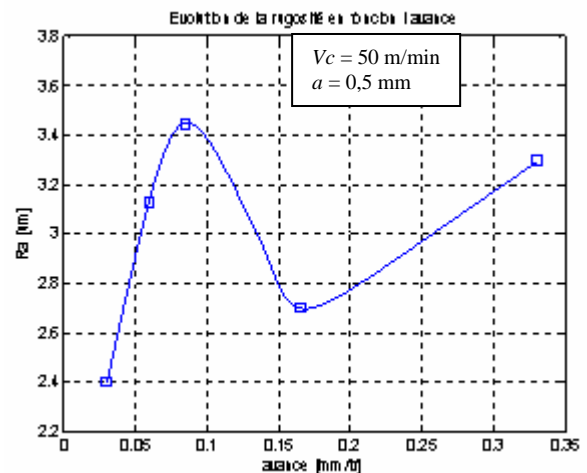


FIG. 4 - Variation de la rugosité avec l'avance.

Dans notre étude, les observations micrographiques des couches superficielles des pièces usinées ont été utilisées pour mettre en évidence l'existence de l'arête rapportée. Cette évidence est supportée par la présence de débris de cette arête sur la surface usinée comme illustré par la figure 5. D'après les résultats obtenus, la valeur maximale de la rugosité correspond à $V_c=15$ m/min, valeur autour de laquelle se situe l'arête rapportée maximale. On montre en outre que l'arête rapportée, malgré de taille réduite, était encore présente à une vitesse de coupe de 28m/min (figure 5a). Au delà d'une vitesse de 50 m/min, l'absence d'arête rapportée (figure 5b) maintient Ra à des valeurs plus réduites. La rugosité est désormais constituée seulement de traces laissées par le profil géométrique de l'outil, ou par son profil déformé durant l'usinage, et d'ondulations d'origine vibratoire.

La variation de la rugosité moyenne en fonction de l'avance par tour est illustrée par la figure 4. Cette figure montre que la rugosité augmente en général avec l'avance par tour. Cette tendance est en accord avec la théorie basée sur la géométrie de l'usinage et qui prédit que la rugosité théorique est proportionnelle à l'avance. On constate néanmoins une forte augmentation pour des avances réduites ($< 0,1$ mm/tr) suivie d'une diminution. L'examen des micrographies de la couche superficielle a permis d'associer ce fait à la taille de l'arête rapportée.

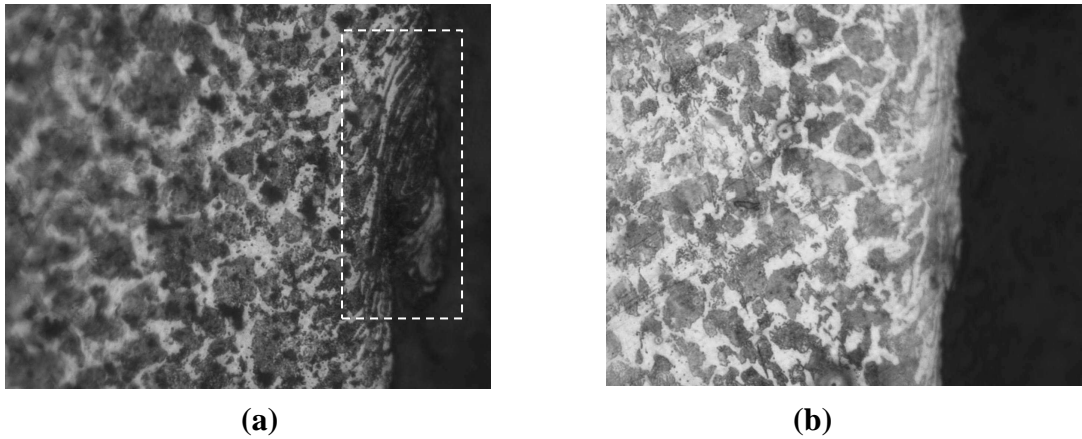


FIG. 5 - Micrographie des couches superficielles des pièces usinées avec $f = 0.085\text{mm/tr}$, $a = 0.5\text{ mm}$ et $V_c = 28\text{ m/min}$ (a) et $V_c = 50\text{ m/min}$ (b). X500

3.2 Comportement en fatigue

Les résultats des essais de fatigue sont présentés en figure 6 sous forme de diagramme de Wöhler montrant l'évolution de la contrainte maximale appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture. Il apparaît que la vitesse de coupe ainsi que l'avance affectent la durée de vie des éprouvettes et la résistance à la fatigue des pièces usinées. Ceci est en général associé à l'influence de ces deux paramètres de coupe sur l'état de surface caractérisé dans notre cas par la rugosité. La tendance générale des résultats de la figure 6a n'est pas bien définie ce qui est en désaccord avec l'hypothèse stipulant que les rugosités élevées entraînent des durées de vies plus petites pour un niveau de contraintes donné et vice-versa. On notera, par exemple, que la durée de vie diminue avec la vitesse de coupe pour une contrainte de 300 MPa mais la variation est bidirectionnelle pour un niveau de contrainte de 350 MPa. La même constatation peut être faite pour l'influence de l'avance (figure 6b). Par conséquent toute tentative de trouver une liaison directe et absolue entre la résistance à la fatigue et la rugosité a été vaine.

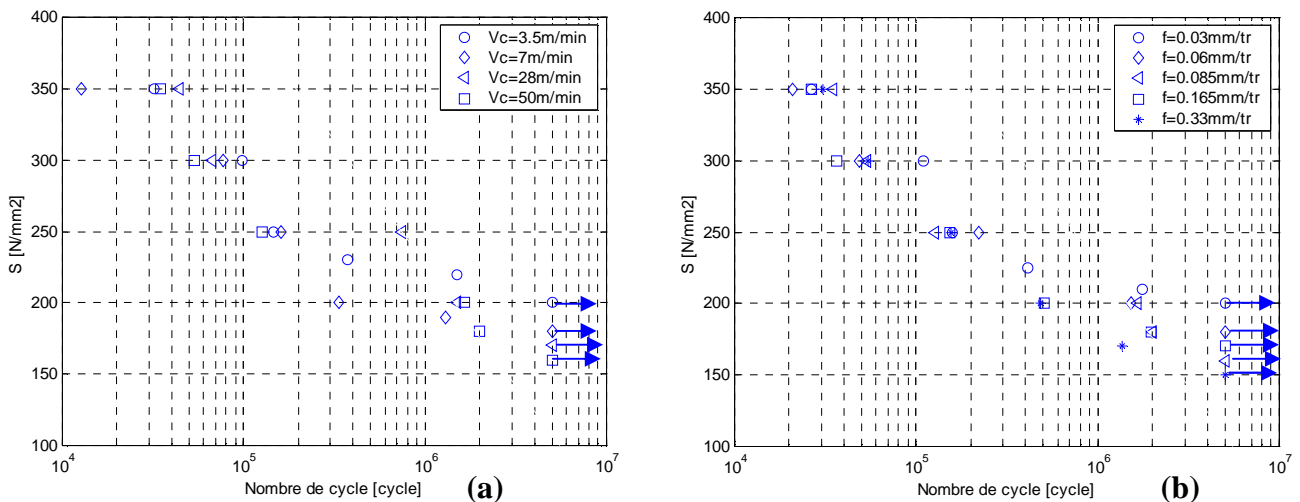


FIG. 6 - Courbe S-N de l'acier XC 48 usiné par tour avec un rayon d'outil $r = 0.8\text{ mm}$, profondeur de passe $a = 0.5\text{ mm}$ à des vitesses de coupe variables (a) et des vitesses d'avance variables (b).

4 Conclusions

Un programme expérimental étendu a été mené pour évaluer l'influence de l'état de surface sur la tenue en fatigue en flexion rotative d'un acier XC48. L'effet de la rugosité de surface a particulièrement été étudié en utilisant des échantillons préparés sous diverses

conditions en tournage leur donnant différents états de surface. Les échantillons ainsi préparés ont ensuite été cyclés sous flexion rotative à divers niveaux de charge.

Les résultats obtenus mettent en évidence un rôle important de l'état de surface sur la résistance et la limite de fatigue de l'acier XC48. Cette influence est néanmoins sans tendance bien définie et à caractère variable. Cette variabilité a été expliquée par la présence de l'arête rapportée et à son caractère instable qui a une forte influence sur la rugosité de surface.

En outre les résultats ne sont pas en agrément de l'hypothèse prédisant une meilleure résistance à la fatigue des pièces ayant des surfaces moins rugueuses.

Ceci nous a mené à suggérer que le paramètre de rugosité seul ne peut expliquer le comportement en fatigue des pièces usinées et il demeure plus correct de considérer simultanément d'autres paramètres de l'intégrité de surface.

Références

- [1] Leskovar P. & Peklenik J. 1982 Influences affecting surface integrity in cutting processes, *Annals of the CIRP*, Vol.31/1, pp.447-450.
- [2] Dupont F. 1988 Aspects microstructural et mécanique des surfaces usinées en alliages d'Aluminium 2024 et 7075, Thèse de doctorat, Dept. des Matériaux, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne.
- [3] Liu C.R. & Barash M.M. 1976 The mechanical state of the sublayer of a surface generated by chip removal process, Part2: Cutting with a tool with a flank wear, *Transaction of ASME, J. Engng. Ind.*, Vol. No.4, pp.1202-1208.
- [4] Koster W. P., Fritz L.J. & Kohls J.B. 1971 Surface integrity in machining of 4340 steel and Ti-6Al-4V, *Society of Manufacturing Engineers, SME Tech Paper no IQ71-237*, Dearborn Mich.
- [5] Jacobson M., Dahlman P., Gunnberg F. 2002 Cutting speed influence on surface integrity of hard turned bainite steel. *J Mat Proc Tech* 128, 318-323.
- [6] Hua J., Umbrello D. & Shivpuri R. 2006 Investigation of cutting conditions and cutting edge preparations for enhanced compressive subsurface residual stress in hard turning of bearing steel *J Mat Proc Tech* 171, 180-187.
- [7] Tonshoff H.K. & Brinksmeier E. 1980 Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhardness and residual stresses analysis, *Annals of the CIRP*, Vol29/2, pp.519-530.
- [8] Field M. & Kahles F. 1971 Review of surface integrity of machined components, *Annals of the CIRP*, Vol.20/2, pp.153-163.
- [9] ALAM A.M. 1998 Influence de gammes de tournage sur l'état de surface et la fatigue en endurance limitée d'un acier de construction, rapport de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse
- [10] Suraratchai M., Mabru R., Chieragatti R. & Aria F.R. 2005 Influence des gammes d'usinage sur la tenue en fatigue d'un alliage léger aéronautique, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes.
- [11] Gaceb M. 1985 An investigation of microcrack formation on machined surfaces, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical and Production Engineering, Sheffield City Polytechnic, July.
- [12] Suhr R.W. 1986 The effect of surface finish on high cycle fatigue of a low alloy steel, *Mechanical Engineering Publications*, London, ISBN0-85298-614-7, pp.68-86
- [13] Bayomi M.R., Abdelatif A.K. 1995 Effect of surface finish on fatigue, *Engineering Fracture Mechanics* 51(5), 861-870
- [14] ST. Enache 1972 La qualité des surfaces usinées, édition DUNOD, 340 p.
- [15] Trent E.M. 1977 *Metal cutting*, Butterworths.
- [16] Oxley P.L.B. 1963 *Mechanics of metal cutting*, Int. Res. In Prod. Engng., Proc. Int. Prod. Engng. Res. Conf., Pittsburgh, Am. Soc. Mech. Engrs., p.50
- [17] Shaw M.C., Usui E. & Smith P.A. 1961 Free cutting steel: III- Cutting forces, surface finish and chip formation, *Trans. A.S.M.E.*, Vol. 83 (Series B), pp.181-193