

Modélisation de la rugosité et de la dureté de surface par la méthodologie de surface de réponse de l'acier S 355 J0 traité par galetage

Modeling of surface roughness and hardness by using response surface methodology of rolled burnished steel S 355 J0

Mohamed Tourab¹, Hamid Hamadache² & Salim Belhadi³

^{1,2} *Laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (LRATPM), Université Badji Mokhtar, BP. 12, Annaba, 23000, Algérie.*

³ *Laboratoire de Mécanique et de Structures, Université 8 Mai 1945, BP. 401, Guelma, Algérie.*

Soumis le 25/07/2016

Révisé le 08/03/2017

Accepté le 08/03/2017

المخلص

التمديك عبارة عن عملية تصليد انفعالي ناتج عن التشوه اللدن للطبقات السطحية للمادة حيث يغير من خصائصها القاعدية. تم في هذا العمل تطبيق عملية التمديك على الفولاذ S 355 J0 باستعمال اداة مصممة ومصنعة خصيصا لهذا الغرض. كشفت نتائج التجارب أن التغذية وقوة التمديك وسرعة الدوران من أهم العوامل التي لها تأثير كبير على خشونة السطح. عدد تطبيقات اداة التمديك جأت لتضاف الى العوامل الاخرى حيث اثرت بشكل مهم على صلادة السطح. فقد تم تحسين خشونة السطح وصلادته من 2,5 مك تقريبا بعد عملية الخراطة الى 0,15 مك بعد عملية التمديك ومن 176 HV الى 226 HV على التوالي. تم استنتاج نموذج رياضي اعتمادا على دراسة إحصائية تقوم على تصميم التجارب (منهجية استجابة الأسطح) وهذا باستعمال تصميم مركب مركزي دائري من الدرجة الثانية لبوكس- هنتر الذي يسمح بإعطاء العلاقة الموجودة بين خشونة السطح وصلادته التي تمثل الطبقات السطحية للمادة بدلالة العوامل الأربعة لعملية التمديك. فقد تم اعتماد النموذجان من خلال حساب معامل التحقق لكل من خشونة السطح $R^2 = 93,1\%$ وصلادته $R^2 = 89,8\%$ حيث اتضح انهما يتطابقان جيدا مع نتائج التجارب المحصل عليها.

كلمات المفتاح: الفولاذ S 355 J0 - التمديك - خشونة السطح - صلادة السطح - منهجية استجابة الأسطح.

Résumé

Le galetage est un procédé de formage à froid par déformation plastique superficielle qui modifie les propriétés de base des couches superficielles du matériau. Dans ce présent travail, le procédé a été appliqué sur l'acier S 355 J0 au moyen d'un dispositif spécialement conçu et fabriqué à cet effet. Les résultats expérimentaux ont révélé que l'avance, la force de galetage et la vitesse de rotation sont les paramètres les plus significatifs sur la rugosité de surface. Le nombre de passes vient s'ajouter aux autres paramètres de galetage qui influence d'une façon significative la dureté. Une rugosité (Ra) de tournage de 2,5 μm a été réduite à 0,15 μm alors qu'une dureté de 176 HV a été augmentée à 226 HV. Un modèle mathématique à été entrepris à partir d'une étude statistique basée sur la méthodologie de surface de réponse en utilisant un plan d'expériences composite centré rotatable de deuxième ordre de Box Hunter pour prédire la rugosité et la dureté des couches superficielles en fonction des paramètres de galetage. Les modèles validés avec un coefficient de détermination R^2 de 93,1% pour la rugosité et R^2 de 89,8% pour la dureté sont en bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : Acier S 355 J0 - Galetage - Rugosité - Dureté - Méthodologie de surface de réponse

Abstract

Burnishing is a cold working process with superficial plastic deformation that changes the basic properties of the surface layers of the material. In this work the process was applied on steel S355J0 by means of a device specially designed and manufactured for this purpose. The experimental results indicate that feed, burnishing force and speed are the most important and significant parameters to improve roughness surface. The number of passes is in addition to other parameters of burnishing has a significant effect on the hardness. The turning surface roughness about 2.5 μm was decreased to 0.15 μm after burnishing, while the hardness about 176 HV was increased to 226 HV. Statistically based on experimental design (response surface methodology) using central composite second-order rotatable design was used to establish a mathematical models for predicting the relationship between surface roughness and microhardness characterizing the superficial layers of the material and the four roller-burnishing parameters. The validated models with coefficient of determination $R^2 = 93.1\%$ for surface roughness and $R^2 = 89.8\%$ for hardness, seem correlate well with the experimental results.

Keywords: Steel S355J0 - Roller-burnishing - Surface roughness - Superficial hardness - Response surface methodology.

1. INTRODUCTION

Malgré leur volume relativement faible par rapport au cœur de la matière, les couches superficielles par l'aspect qu'elles présentent jouent un rôle fondamental pour caractériser la résistance globale des pièces mécaniques. Ainsi, il est apparu qu'un mauvais état aussi bien physique que géométrique de ces couches peut être responsable d'environ 85% des ruptures des éléments de structure.

Un durcissement structural ou par écrouissage ne suffit pas à lui seul pour améliorer la tenue en service d'une pièce mécanique, c'est pour quoi un bel état technologique de surface est souvent exigé pour réduire l'effet de micro-concentration des contraintes, améliorer les propriétés tribologiques, atténuer l'action agressive de l'environnement (corrosion), améliorer le contact des pièces conjuguées avec la moindre usure et donc garantir la tenue en service des éléments de structure. La performance d'une telle structure est d'autant plus meilleure que les contraintes résiduelles induites par les procédés de mise en œuvre sont de compression c'est-à-dire qui tendent à décharger la structure de l'action de service à laquelle elle est sollicitée.

Malgré le développement de matériaux à outil super durs comme le nitrure de bore cubique ou les céramiques revêtus [1], les procédés d'usinage conventionnels tels que : le tournage ou le fraisage usuellement intégrés dans le processus de fabrication des pièces produisent des surfaces avec des irrégularités inhérentes ; on recourt alors aux procédés de super finition comme la rectification, le rodage ou le honing pour finir les surfaces. Certains de ces procédés de part leurs coûts élevés sont parfois insuffisants pour améliorer les propriétés physiques du matériau. Dans plusieurs domaines de l'industrie mécanique, les meilleurs résultats pour les pièces à risque d'endommagement par usure, corrosion ou fatigue sont obtenus en effectuant un traitement qui allie un bel état de surface à un durcissement superficiel associé à une précontrainte de compression.

Ces résultats sont souvent retrouvés au moyen des traitements mécaniques de surface (TMS) tel que le brunissage, le grenailage, le sablage, le choc laser, le martelage, ou galetage, etc. De tels procédés, constituent dans la majorité des cas, des moyens curatifs pour améliorer la tenue en service des pièces devant subir des efforts cycliques engendrant un phénomène de fatigue [2] ou des actions de contacts locales, associées éventuellement à un environnement hostile qui altèrent les pièces par phénomène d'usure ou de corrosion[3].

L'un de ces TMS qui trouve une large application de nos jours est le galetage [4, 5]. En mettant en œuvre une déformation plastique à froid des couches superficielles, il confère aux matériaux trois principaux effets bénéfiques. En fait, le procédé conduit en général à une surface caractérisée par une faible rugosité [5, 6], une augmentation de la dureté de surface [7, 8] résultant d'un écrouissage des couches superficielles [9, 10] et des contraintes résiduelles de compression [11, 12]. De ce nouvel aspect se déduit une bonne capacité portante de la surface [13], une diminution du frottement entre les pièces et donc une augmentation de la résistance à l'usure [3, 14] et par conséquent une amélioration de la tenue en fatigue et fatigue corrosion [2, 15].

Le galetage peut être appliqué aux différents types de matériaux d'une dureté Rockwell allant jusqu'à 42 HRC, ayant une résistance à la rupture inférieure à 130 daN/mm^2 et dont la ductilité (allongement) dépasse les 6% [16]. Grâce à la déformation plastique qu'il confère aux couches superficielles, le galetage est largement expérimenté avec succès sur des matériaux biodégradables [17], les matériaux non ferreux [14] et même les polymères [18].

En se déformant, les crêtes des aspérités de surface s'aplatissent dans les creux et assurent un bon lissage de la surface (Fig. 1). La hauteur moyenne des creux et crêtes de rugosité peut être réduites de 30 à 50%. Il en résulte une amélioration de la rugosité de l'ordre de 80 à 90% [5, 19]. En optimisant les paramètres de brunissage certains travaux ont montré que des rugosités initiales de 5,92 et $1 \mu\text{m}$ peuvent être finies par galetage respectivement à 0,172 et $0,07 \mu\text{m}$ [20, 21].

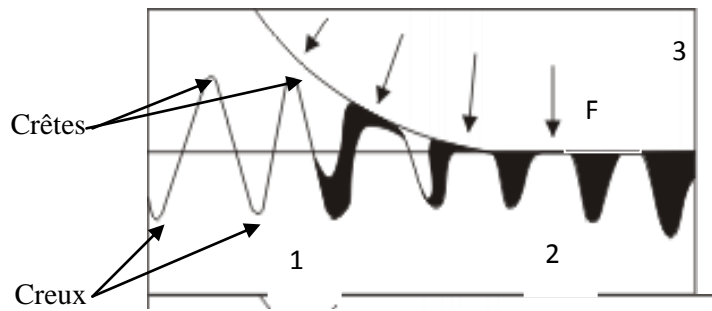


Figure. 1 - Effet du galetage sur la surface avec 1- surface usinée, 2- surface galetée, 3- galet et F- force de galetage.

Outre son influence favorable à la rugosité de surface, et selon le matériau et les conditions d'application, le galetage peut augmenter la dureté de 10 à 120% [3, 22] et générer un maximum de contraintes résiduelles sur une profondeur de 40 à 200 μm [12].

Les surfaces traitées par galetage offrent alors entre autre une bonne résistance à l'initiation et/ou la propagation des fissures de fatigue. Certains travaux ont fait part d'une amélioration de la tenue en fatigue de 110% à 300% [4]. Par ailleurs, le galetage peut être opéré sur les postes d'usinages conventionnels et non conventionnels avec des outils (dispositifs) de plus en plus performants tel que des outils hydrostatique [12], assistés par vibration [23] ou par laser [24] ou même des outils hybrides [25], etc.

Avec tous ses avantages bénéfiques, le galetage peut être qualifié comme un procédé de finition sans enlèvement de copeau par excellence et constituer une alternative aux procédés de finition par enlèvement de copeaux telle que la rectification jugée trop lente et onéreuse. Ces dernières années, plusieurs recherches ont été conduites avec les paramètres optimaux du galetage pour étudier ses effets sur principalement la rugosité, la dureté et l'endurance du matériau. Les paramètres les plus prépondérants sont la vitesse, l'avance, l'effort, le rayon de l'outil et le nombre de passe [12, 26]. Quoique d'autres paramètres comme l'état initial, la profondeur de pénétration ou la durée du traitement sont parfois intégrés [3, 13].

Les réponses de sorties sont dans la majorité des cas mesurées à partir des essais expérimentaux à partir des plans d'expériences de Taguchi [27], Box Behnken [28] ou Box Hunter [26]. Les résultats peuvent aussi être prédits à partir de différents modèles basés sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) [26-28], les réseaux artificiels de Neurones [29] ou les éléments finis [30].

Ce travail examine l'effet d'un galetage par galet en acier dur 100 C 6 sur les propriétés de surface d'un acier S 355 J0. l'accent est mis sur l'influence des paramètres du régime du traitement sur la rugosité et la dureté. Un modèle mathématique déduit de la méthodologie de surface de réponse utilisant un plan d'expérience composite centré rotatable de deuxième ordre tel que définit par Box hunter [31], a été établi en vue de prédire la réponse de sortie (rugosité et dureté de surface) en fonction des quatre paramètres d'entrée du régime de galetage à savoir : la vitesse de rotation de la pièce, la force de galetage, l'avance et le nombre de passes de l'outil de galetage.

2. TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET METHODOLOGIE D'EXPERIENCE

2.1. Matériau

Le matériau étudié est l'acier non allié désigné par S 355 J0 selon la norme NF EN10027-1-2 (ASTM A-441), livrée à l'état brut de laminage. Ce matériau a été sélectionné à cause de son importance dans le domaine industriel et sa bonne aptitude à subir le traitement de galetage. Une analyse chimique effectuée par absorption atomique a permis de révéler les constituants suivants : 0,12% C ; 0,6% Mn ; 0,55% Si ; 0,045% P et 0,045% S.

Les caractéristiques mécaniques du matériau ont été définies à l'aide d'un essai de traction effectué sur des éprouvettes cylindriques (ISO 6892-1) prélevées du matériau en question et ont été évaluées par $R_e = 363,4 \text{ MPa}$, $R_m = 427,3 \text{ MPa}$ et $A\% = 34\%$. La ténacité a été testée au moyen d'un essai de

résilience opérée sous une température de 0 °C sur une éprouvette entaillée en V : l'essai a permis de dégager une valeur KCV = 35 J/cm². La dureté du matériau est de l'ordre de 180 HB.

2.2. Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes ont été débitées à partir d'une barre cylindrique de diamètre 30 mm et une longueur 6000 mm. Avant de se présenter au galetage conformément au plan d'expérience préalablement établi. Chaque éprouvette a été usinée à un diamètre de 26 mm est divisée en paliers de 20 mm de long séparés par des gorges de 2 x 2 mm. La préparation a lieu sur un tour conventionnel type « gallic 16 n » avec un montage mixte de la pièce afin d'assurer sa bonne rigidité durant l'usinage (Fig. 2). Les conditions de coupe effectuées au moyen d'un outil à plaquette en carbure P15 type DNMG 15-06-08, ont été caractérisées par une fréquence de rotation de la broche de 1000 tr/min, une avance de l'outil de 0,18 mm/tr et une profondeur de coupe de 1 mm.

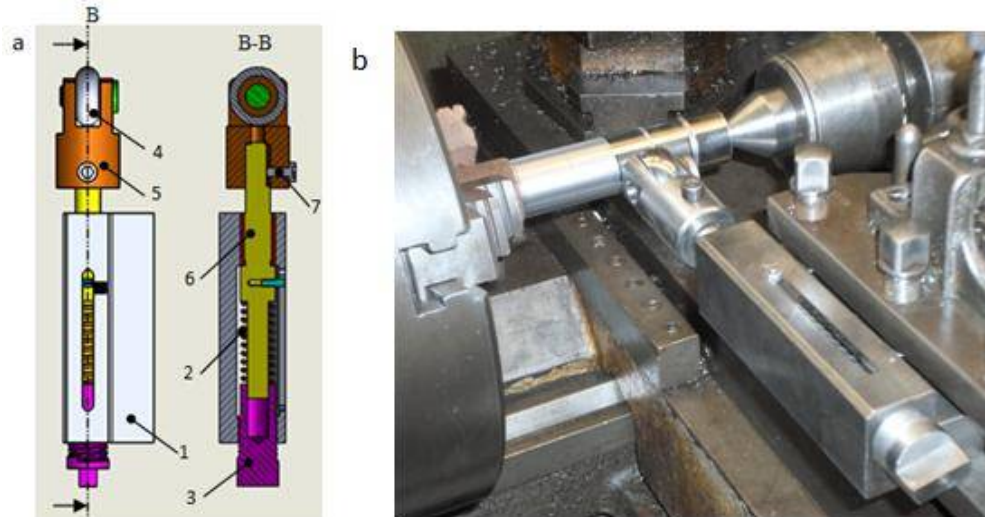


Figure. 2 - Outil de galetage, **a)** vue en coupe : 1- corps, 2- ressort, 3- tige filetée, 4- galet, 5- chape, 6- axe principal et 7- vis à six pans **b)** montage de l'outil sur le tour.

Les mesures de la rugosité ont été effectuées respectivement au moyen d'un rugosimètre de marque Mitutoyo série SJ-201P/R avec une longueur de palpement de 0,8 mm effectuée cinq fois de suite d'où une longueur totale d'évaluation de 4 mm (0,8 mm*5). Le rugosimètre est par ailleurs capable de transcrire le signal reçu en critère Rz ou Ra avec une précision de $\pm 15\%$ (Fig. 3a). Pour une bonne efficacité de des essais et une précision accrue de mesure, le rugosimètre a été intégré par un montage spécial sur le tour (Fig. 3b) et une valeur moyenne de trois mesures a été enregistrée pour chaque essai.

La dureté a été testée au moyen d'un duromètre universel type Innovatest série NEXUS 7000 à indenteur Vickers et affichage digital (Fig. 4). L'appareil doté d'un bras micrométrique et d'un écran digital permet de tester la dureté à différents pas d'essai sur toute la génératrice de la pièce et de convertir la valeur mesurée en d'autre critère de dureté.

Les essais ont été conduits sous une charge de 10 kgf appliquée pendant 15 s (HV10/15) et chaque valeur de la dureté mesurée doit être multipliée par un facteur de correction selon la norme ISO 6507 relative aux essais de dureté sur des surfaces cylindriques avant d'être définitivement retenue.

A l'état initial après tournage, les essais de rugosité et de dureté ont permis d'enregistrer des valeurs moyennes de $Ra = 2,5 \mu\text{m}$ et $HV10 = 176$ respectivement.

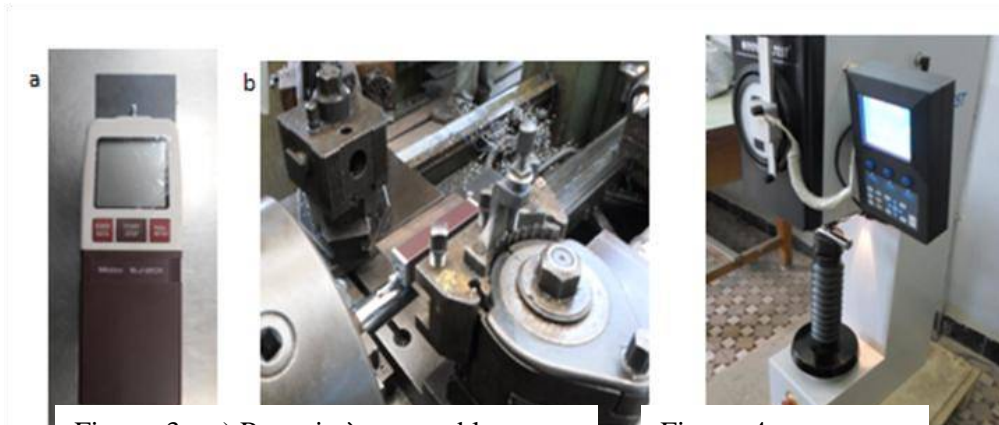


Figure. 3 – a) Rugosimètre portable Mitutoyo SJ-201P/R, b) Montage du rugosimètre sur le tour. (b).

Figure. 4 - Duromètre Innovatest

2.3. Techniques du galetage

L'opération du galetage est effectuée sur un tour au moyen d'un dispositif conçu et fabriqué par nos propres soins. L'outil est composé d'un corps (1) qui sert à le fixer aisément dans le porte outil du tour. La partie active est un galet (4) en acier 100 C 6 (AISI 52100) d'une dureté de 63 HRC a été fabriqué avec une rugosité de surface de $0.015 \mu\text{m}$ et un rayon de courbure de 3 mm (Fig. 2a). Son montage sur le corps est assuré par l'intermédiaire d'une chape (5) ajustée sur l'axe principal (6) par une vis à six pans (7).

L'effort de galetage est assuré par une tige fileté (3) qui agit sur la raideur du ressort (2). L'étalonnage de différentes forces de galetage est assuré par l'application successive des poids de différentes masses et la compression correspondante du ressort. A cet effet on a retenu un déplacement de 5 mm du ressort pour approximativement un effort de galetage de 5 kgf. De cette façon, Le galetage est opéré de manière analogue au chariotage, à la différence près que la déformation plastique superficielle est assurée par un effort de formage exercé par le galet sur la pièce animée d'un mouvement de rotation. Le mouvement d'avance étant attribué à l'outil (Fig. 2b).

Le travail est effectué à sec sans lubrification. Toutes fois avant l'opération de galetage la surface à traiter et le galet de l'outil doivent être nettoyés soigneusement à l'alcool afin d'éviter l'incrustation des petites particules dures dans la zone de contact outil-pièce et susceptibles de rayer l'un ou les deux éléments.

L'opération est conduite sous un régime tenant compte de la dureté initiale du matériau et de la rigidité du système Machine-Outil-Pièce (M.O.P). Ce régime auparavant déterminé [3] est consigné dans le tableau 1.

2.4. Plan d'expérience

L'objectif principal est de dégager une relation entre la rugosité (Ra) et la dureté (HV) en fonction des paramètres du galetage. Pour cette raison, le plan composite centré rotatable de deuxième degré de Box-Hunter [26, 31] s'avère le plus convenable pour décrire les réponses de sortie dans la mesure où il offre une gamme de valeurs des paramètres de galetage aisément compatible avec les valeurs réglable sur la machine outil utilisée par rapport aux autres plans qui appartiennent à la même méthodologie de surface de réponse. Selon ce plan, le nombre d'essais N est défini par la relation suivante :

$$N = N_f + N_\alpha + N_0 \quad (1)$$

Avec :

$N_f = 2^k$: Nombre d'essais d'un plan factoriel complet (Fig. 5).

k : Nombre de paramètres d'entrée étudiés.

$N_\alpha = 2k$: Nombre d'essais en étoile sur les axes à une distance α du centre du domaine avec :

$\alpha = \sqrt[4]{N_f}$: Nombre de points étoiles sur les faces du cubes (Fig. 5).

N_0 : Nombre d'essais au centre du domaine choisi [32].

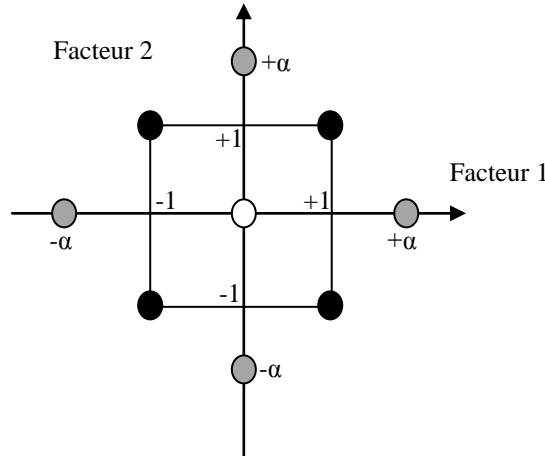


Figure. 5 - Plan composite centré pour deux facteurs. Les points factoriels en noirs, les points en étoile en gris et les points centraux en blanc [32]

La résolution de l'Equation 1 permet de dégager pour les 4 facteurs étudiés dans le cadre de ce travail un nombre de 31 essais. 16 essais d'entre eux qui constituent le plan factoriel complet (N_f) sont réalisés en combinant les niveaux extrêmes des différents paramètres. 8 autres essais composant un plan en étoile (N_α) sont conduits avec valeurs extrêmes élargies au coefficient $\alpha = \pm 2$ qu'on combine avec les valeurs médianes de chaque intervalle de variation de paramètres d'entrée. Enfin un essai répété 7 fois (N_0) est conduit avec valeurs médianes des domaines de variations de chacun des facteurs envisagés. De cette façon chacun des 4 facteurs constituant les variables d'entrée est considéré pour 5 niveaux. Le tableau 1 illustre les valeurs naturelles et codées (X_i) des différents niveaux de chaque paramètre.

Tableau 1 – Codes et niveaux de variation des paramètres du galetage.

Paramètres	Codes	Niveaux				
		-2	-1	0	1	2
Force F [kgf]	X_1	5	10	15	20	25
Nombre de passes P	X_2	1	2	3	4	5
Vitesse de rotation N [tr/min]	X_3	200	400	600	800	1000
Avance f [mm/tr]	X_4	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15

La combinaison des valeurs de l'ensemble des paramètres représente la matrice d'expériences (Tab. 2). La réponse de sortie (y) peut être prédite d'après le modèle quadratique décrit par l'équation 2:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{44}x_4^2 + a_{12}x_{12} + a_{13}x_{13} + a_{14}x_{14} + a_{23}x_{23} + a_{24}x_{24} + a_{34}x_{34} + e \tag{2}$$

Le passage des variables naturels aux variables codées X_i , et inversement, est donné par les équations 3 à 6.

$$X_1 = \frac{F - 15}{5} \tag{3}$$

$$X_2 = \frac{P-3}{1} \quad (4)$$

$$X_3 = \frac{N-600}{200} \quad (5)$$

$$X_4 = \frac{f-0,1}{0,05} \quad (6)$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Analyse statistique

Le tableau 2 montre la matrice d'expérience de Box-Hunter ainsi que les résultats expérimentaux relatifs aux deux réponses de sortie (rugosité et dureté) en tenant compte de la combinaison des facteurs d'entrée aux différents niveaux.

Tableau 2 - Matrice d'expérience et résultat expérimental.

Essai	Force		Nb. de passes		Vitesse		Avance		Rugosité	Dureté
	codé	Naturel	codé	Naturel	codé	Naturel	codé	Naturel	Naturel	Naturel
	X ₁	F	X ₂	P	X ₃	N	X ₄	f	Y ₁	Y ₂
1	-1	10	-1	2	-1	400	-1	0.075	0,51	203
2	+1	20	-1	2	-1	400	-1	0.075	0,21	208
3	-1	10	+1	4	-1	400	-1	0.075	0,39	193
4	+1	20	+1	4	-1	400	-1	0.075	0,20	206
5	-1	10	-1	2	+1	800	-1	0.075	0,16	226
6	+1	20	-1	2	+1	800	-1	0.075	0,33	198
7	-1	10	+1	4	+1	800	-1	0.075	0,50	216
8	+1	20	+1	4	+1	800	-1	0.075	0,28	209
9	-1	10	-1	2	-1	400	+1	1.25	0,15	177
10	+1	20	-1	2	-1	400	+1	1.25	0,43	196
11	-1	10	+1	4	-1	400	+1	1.25	0,15	184
12	+1	20	+1	4	-1	400	+1	1.25	0,50	210
13	-1	10	-1	2	+1	800	+1	1.25	0,53	191
14	+1	20	-1	2	+1	800	+1	1.25	1,31	190
15	-1	10	+1	4	+1	800	+1	1.25	0,38	196
16	+1	20	+1	4	+1	800	+1	1.25	1,27	202
17	-2	5	0	3	0	600	0	0.1	0,36	190
18	+2	25	0	3	0	600	0	0.1	0,95	201
19	0	15	-2	1	0	600	0	0.1	0,36	196
20	0	15	+2	5	0	600	0	0.1	0,31	201
21	0	15	0	3	-2	200	0	0.1	0,15	190
22	0	15	0	3	+2	1000	0	0.1	0,45	199
23	0	15	0	3	0	600	-2	0.05	0,15	222
24	0	15	0	3	0	600	+2	0.15	0,78	197
25	0	15	0	3	0	600	0	0.1	0,27	198
26	0	15	0	3	0	600	0	0.1	0,17	191
27	0	15	0	3	0	600	0	0.1	0,20	191
28	0	15	0	3	0	600	0	0.1	0,20	194
29	0	15	0	3	0	600	0	0.1	0,19	202
30	0	15	0	3	0	600	0	0.1	0,25	203
31	0	15	0	3	0	600	0	0.1	0,30	203

Les résultats des essais montrent que la rugosité varie de 0,15 à 1,31 μm , alors que les duretés obtenues couvrent un domaine de 177 à 226 HV. A premier constat on remarque que le galetage améliore la rugosité et la dureté de surface.

Le modèle est considéré statistiquement signifiant si la probabilité (p -value) est inférieure à 0,05 (95% de confiance). Une faible p -value indique qu'une signification statistique pour la source des réponses correspondante. Un autre coefficient important est le coefficient de détermination R^2 qui définit le rapport de variation des résultats du modèle et ceux de l'expérience. Lorsque ce coefficient approche l'unité cela veut dire que le modèle convient parfaitement aux résultats de mesure des réponses de sortie envisagées.

3.2. Modèles mathématiques

La résolution de l'équation 2 du modèle quadratique pour la prédiction des réponses de sortie (Ra et HV) a été effectuée au moyen du logiciel Minitab16 qui permet entre autre d'analyser la variance (ANOVA) et d'évaluer l'importance des coefficients (a_i) et par conséquent le taux d'influence de chacun des paramètres du galetage sur les réponses de sortie. L'importance des coefficients les plus significatifs a été mise au moyen du test de Student (Tab. 3). A cet effet, les coefficients (a_i) les plus significatifs sont ceux dont la valeur dépasse celle du coefficient de Student standard estimé avec une erreur (p -value) de 5 % à : $t_{0,05 - 16} = 1,746$.

Tableau 3 - Coefficients a_i des modèles et leurs significations.

Coefficient s	Rugosité de surface Ra				Dureté de surface HV			
	valeur	E-type	t - Student	p -value	valeur	E-type	t - Student	p -value
a_0	0.2257*	0.03596	6.276	< 0.0001	197.4286*	1.5142	130.384	< 0.0001
a_1	0.1225*	0.01942	6.307	< 0.0001	2.2917*	0.8178	2.802	0.013
a_2	-0.0025	0.01942	-0.129	0.899	1.5417*	0.8178	1.885	0.078
a_3	0.1175*	0.01942	6.05	< 0.0001	2.875*	0.8178	3.516	0.003
a_4	0.1417*	0.01942	7.294	< 0.0001	-6.7917*	0.8178	-8,305	< 0.0001
a_{11}	0.1102*	0.01779	6.195	< 0.0001	-0.3467	0.7492	-0.463	0.65
a_{22}	0.0302	0.01779	1.699	0.109	0.4033	0.7492	0.538	0.598
a_{33}	0.0214	0.01779	1.208	0.245	-0.5967	0.7492	-0.797	0.437
a_{44}	0.0627*	0.01779	3.526	0.003	3.1533*	0.7492	4.209	0.001
a_{12}	-0.0063	0.02379	-0.263	0.796	2.6875*	1.0016	2.683	0.016
a_{13}	0.0925*	0.02379	3.889	0.001	-5.8125*	1.0016	-5.803	< 0.0001
a_{14}	0,1775*	0.02379	7.462	< 0.0001	4.1875*	1.0016	4.181	0.001
a_{23}	0,01	0,02379	0,42	0.68	0.5625	1.0016	0.562	0.582
a_{24}	-0,0175	0,02379	-0,736	0.473	3.0625*	1.0016	3.058	0.008
a_{34}	0,1438*	0,02379	6,043	< 0,0001	-1.6875	1.0016	-1.685	0.111

Valeur standard de t de Student test : $t_{0,05 - 16} = 1.746$.

* Coefficient significatif.

Après résolution du modèle et appréciation des coefficients les plus significatifs, les deux réponses de sorties prédites sont comme suit :

$$R_a = 0.2735 + 0.1225x_1 + 0.1175x_3 + 0.1417x_4 + 0.1053x_1^2 + 0.0578x_4^2 + 0.0925x_{13} + 0.1775x_{14} + 0.1438x_{34} \quad (7)$$

$$HV = 196.974 + 2.2917x_1 + 1.5417x_2 + 2.875x_3 - 6.7917x_4 + 3.201x_4^2 + 2.6875x_{12} - 5.8125x_{13} + 4.1875x_{14} + 3.0625x_{24} \quad (8)$$

L'analyse de la variance (ANOVA) pour valider les modèles (Eq. 7 et 8) a été sanctionnée par le test de Fisher (Tab. 4). L'analyse statistique des résultats de la rugosité dont les termes d'ordre 1 possèdent 3 degrés de liberté (avec un résidu de 22) a fait apparaître une valeur standard du rapport de Fisher (pour le niveau significatif $\alpha = 0,05$) $F_{0,05(3, 22)} = 3,10$. Pour les termes d'ordre 2 ayant 5 degrés de liberté et pour le même résidu le rapport (coefficient) est de $F_{0,05(5, 22)} = 2,71$.

Tableau 4 - Test de Fisher pour la rugosité et dureté de surface.

Réponses	Source des variations	Somme des carrés	Degrés de liberté dll	Carré moyen	Fisher
Rugosité de surface Ra	Termes d'ordre 1	1.17317	3	0.391056	45.78
	Termes d'ordre 2	1.36439	5	0.272878	31.94273
	Résidus	0.18794	22	0.008543	
	Total	2.7255	30 (N-1)		
La valeur standard du rapport de Fisher pour le niveau significatif $\alpha = 0,05$ et degrés de liberté 3 et 22 est $F_{0,05(3, 22)} = 3.10$ et à un degré de liberté 5 et 22 est $F_{0,05(5, 22)} = 2.71$.					
Dureté de surface HV	Termes d'ordre 1	1488.5	4	372.13	23.9
	Termes d'ordre 2	1388.13	5	277.63	17.83
	Résidus	327.05	21	15.57	
	Total	3203.68	30 (N-1)		
La valeur standard du rapport de Fisher pour le niveau significatif $\alpha = 0,05$ et degrés de liberté 4 et 21 est $F_{0,05(4, 21)} = 2.87$ et à un degré de liberté 5 et 21 est $F_{0,05(5, 21)} = 2.71$.					

En ce qui concerne la dureté la même analyse statistique a révélé pour le même niveau significatif ($\alpha = 0,05$) un nombre de degrés de liberté de 4 et 5 pour les termes d'ordre 1 et 2 respectivement. Avec un résidu de 21, la valeur standard du rapport de Fisher est de $F_{0,05(4, 21)} = 2.87$ et $F_{0,05(5, 21)} = 2,71$ pour ces deux termes respectivement. Ce résultat a été apprécié avec des coefficients de détermination (R^2) de 93.1% et 89.8% pour la rugosité et la dureté respectivement.

3.3. Discussion

L'analyse des équations finales des modèles de la rugosité et de la dureté ont permis de dégager les paramètres du régime de galetage les plus significatifs et l'influence de leurs interactions sur les réponses de sorties. Il est à remarquer que la rugosité prédite (Eq.7) est fortement influencée par l'avance, la force de galetage ainsi que la vitesse de rotation de la pièce. La rugosité augmente proportionnellement avec ces trois facteurs qui représentent les paramètres les plus significatifs du galetage. La dureté semble être plus affectée par l'avance de l'outil dont l'augmentation réduit la valeur prédite (Eq. 8). A un moindre degré d'influence, la vitesse de rotation, la force et le nombre de passes de l'outil de galetage sont respectivement les autres paramètres les plus influents. Leurs augmentations sont favorables à la dureté.

Les deux modèles de prédictions montrent bien que les interactions de l'effort de galetage avec la vitesse (F-N) et l'avance (F-f) ainsi que la vitesse avec l'avance (N-f) peuvent influencer l'évolution de la rugosité.

Lorsque la force du galetage interagit avec le nombre de passes (F-P), l'avance (F-f) et la vitesse (F-N) ou lorsque le nombre de passe est combiné à l'avance (P-f), c'est la dureté qui se trouve affectée d'une façon ou d'une autre.

Les principales interactions ont été mises en évidence à partir d'une résolution graphique des modèles de prédiction des deux réponses de sorties.

Les courbes de l'effet de principales interactions entre les paramètres du régime de galetage ont été tracées au moyen du logiciel Design expert et montrent l'influence simultanée de deux principaux paramètres de galetage alors que les deux autres paramètres ont été fixés à leurs niveaux moyens.

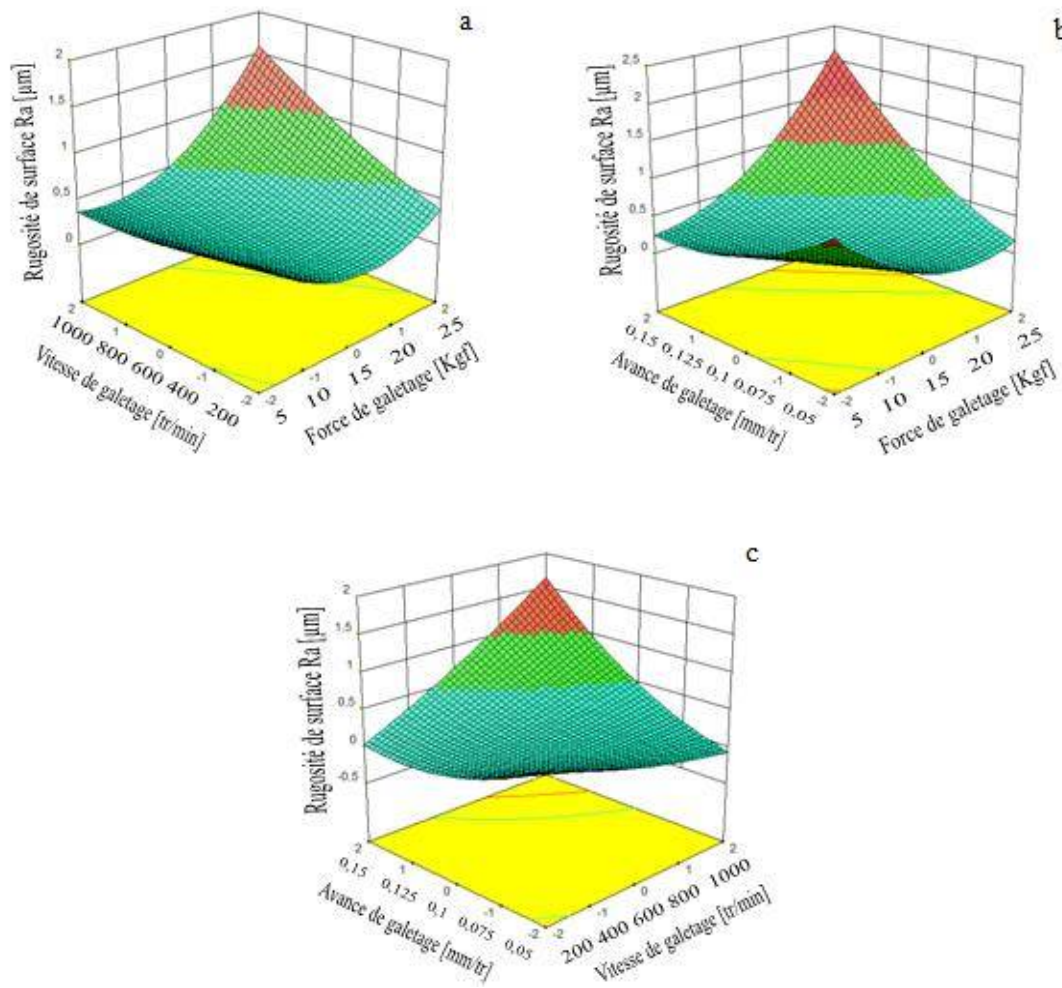
3.3.1 Influence des paramètres du galetage sur la Rugosité

La figure 7a illustre l'effet de la force de galetage et la vitesse de rotation sur la rugosité (R_a). L'aspect de surface est d'autant plus meilleur qu'une augmentation de la force est combinée à de faibles valeurs de la vitesse de rotation de la pièce. Dans ce cas la rugosité se réduit jusqu'à une force de 15 kgf. On estime que jusqu'à cette valeur de la force, le galet offre les meilleures performances d'écraser les aspérités de rugosité et de les mieux remplir dans les crêtes et par conséquent le profil de rugosité est mieux aplati et la surface est plus lisse (moins rugueuse). Au delà de 15 kgf, l'effet de la force s'inverse quelque soit la vitesse associée et l'état de surface s'altère. Le phénomène prend de l'ampleur pour les grandes vitesses puisque dans ce cas le système outil-pièce perd de sa rigidité et donne naissance au phénomène de broutement dans la zone de mise en œuvre (contact outil pièce). Toutefois, Le meilleur résultat est enregistré pour une force de galetage de 25 kgf et une vitesse de rotation de 200 tr/min. En effet une grande force de galetage assure une meilleure pénétration de l'outil dans la couche superficielle et par conséquent un nivellement harmonique des aspérités d'usinage par écrasement des crêtes des sillons dans leurs creux. Le lissage du profil de rugosité qui en résulte est d'autant plus favorisé que la vitesse de rotation de la pièce est prise à son niveau bas puisque dans ce cas le temps de contact outil-pièce est tel que l'outil assure l'aplatissement des aspérités le plus adéquat.

La Figure 7b indique l'effet de la force de galetage combinée à l'avance sur la rugosité de surface. La rugosité de surface diminue graduellement avec l'augmentation de la force de galetage au fur et à mesure que l'avance diminue. Ce paramètre réduit le pas des sillons et aide la force de galetage à niveler les aspérités d'usinage de façon plus régulière. Une interaction optimale est retrouvée avec l'interaction d'une force de galetage de 25 kgf avec une avance de 0,05 tr/min. En plus de l'effet positif de la force de galetage élevée, une faible avance de galetage a aussi un effet analogue à celui de la force car la distances entre les deux traces successives de l'outil de galetage est faible et permet à l'outil d'écraser davantage les aspérités de surface laissées par le procédé antérieur (tournage).

La Figure 7c montre des effets contradictoires de la vitesse de rotation de la pièce et de l'avance de l'outil sur la rugosité. En augmentant le pas des sillons, l'outil ne peut pas affecter harmoniquement la génératrice à galeter. Ainsi, les grandes vitesses d'avance l'emportent sur les valeurs élevées de la vitesse pour altérer l'état de surface.

Le meilleur résultat est obtenu pour une vitesse de 1000 tr/min et une avance de galetage de 0.05 mm/tr. Cela peut être expliqué par l'effet prononcé de l'avance de galetage sur la rugosité de surface lorsqu'elle est faible, malgré que la vitesse de rotation élevée puisse causer le phénomène de broutement réduisant ainsi le contact entre la surface de la pièce et celle du galet.



3.

Figure. 7- Effet de l'interaction des paramètres du régime de galetage sur la rugosité **a)** effet de la force et la vitesse de rotation **b)** effet de la force et l'avance **c)** effet de la vitesse de rotation et l'avance.

La Figure 8a montre l'effet de la force de galetage et le nombre de passes de l'outil sur la dureté de surface. Avec l'augmentation de la force de galetage, la dureté de surface diminue graduellement lorsque le nombre de passes s'amenuise. Cependant une augmentation de la force de galetage conjointement avec l'augmentation du nombre de passes semble favoriser davantage l'écrouissage des couches superficielles et augmenter leur dureté. La combinaison des valeurs extrêmes de ces deux paramètres (25 kgf avec 5 passes) favorise une meilleure dureté. Une force de galetage élevée permet une bonne déformation plastique suivie par un écrouissage de la couche superficielle de la surface traitée. En répétant cette action, On améliore la dureté de surface.

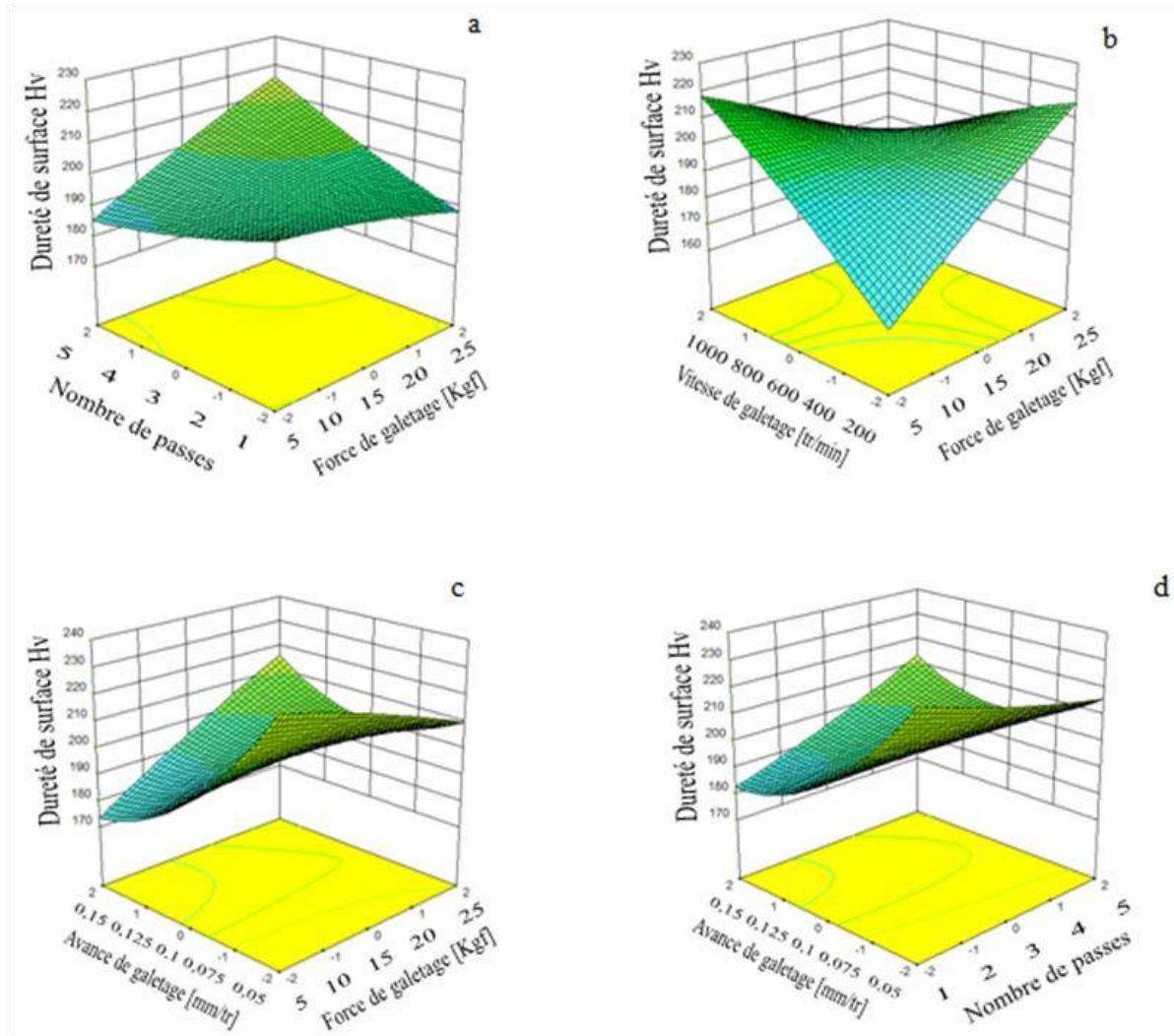


Figure. 8 - Effet de l'interaction des paramètres du régime de galetage sur la dureté **a)** effet de la force et le nombre de passes **b)** effet de la force et la vitesse de rotation **c)** effet de la force et l'avance **d)** effet du nombre de passes et l'avance.

L'effet de la force et la vitesse de rotation sur la dureté de surface est indiqué dans la Figure 8b. L'évolution de la dureté en fonction de ces deux paramètres prend la même allure. La dureté est d'autant mieux appréciée que les grandes vitesses seront combinées à de faibles efforts de galetage. Quoique de grandes forces contribuent à écrouir davantage les couches superficielles, une vitesse élevée est d'une part souvent à l'origine au phénomène d'écaillage et d'autre part amenuise l'écrouissage de se manifester de façon intensive et conduit à réduire la dureté. La chute de dureté prend de l'ampleur pour des faibles forces associées à de grandes vitesses. Ainsi, le galetage est plus efficace soit en associant de grands efforts à de petites vitesses (25 kgf à 200 tr/min) ou au contraire de faibles efforts à des grandes vitesses (5 kgf à 1000 tr/min). Une bonne pénétration de l'outil dans la surface due à la force appliquée et un bon contact entre la surface traitée et celle du galet pour une faible vitesse favorise ainsi un bon écrouissage de la surface résultat d'une déformation plastique qui causera une amélioration dans la dureté de surface.

La Figure 8c indique l'effet de la force de galetage et l'avance sur la dureté de surface. Contrairement aux vitesses de rotation, les faibles valeurs d'avance se combinent de façon avantageuse aux faibles forces de galetage pour augmenter la dureté. Un travail lent rapproche les sillons d'usinage (faible pas) et pourrait être une occasion à l'outil d'avoir tout le temps nécessaire pour mieux répartir l'écrouissage à travers les couches superficielles d'où une meilleure dureté. Cependant si pour une question de temps, l'on veut travailler à de grandes avances il est recommandé d'en associer d'importantes forces

de galetage pour en augmenter la dureté. A cet effet, deux résultats optimaux sont obtenus en combinant une force de 5 kgf à une avance de 0,05 mm/tr et une force de 25 kgf à une avance de 0,15 mm/tr. Une influence analogue à celle de f et F est constatée lors de l'interaction de l'avance avec le nombre de passes (Fig. 8d). Même si en travaillant rapidement (grande avance), l'écrouissage se manifeste mieux au fur et à mesure qu'on répète l'opération de galetage (grand nombre de passes), et la dureté augmente. A faible avance de galetage (0,05 mm/tr), une seule passe d'outil suffit pour donner la meilleure dureté. On peut dire qu'une faible avance de galetage a un effet positif sur la dureté de surface quelque soit la valeur de la force utilisée, car la distances entre les deux traces successives de l'outil de galetage est faible et permet à l'outil de mieux déformer les aspérités de surface laissées par le procédé antérieur (tournage) qui causera une amélioration en plus dans la dureté de surface.

Les travaux de recherche réalisés par [33] sur un acier non allié Steel-37 (S235) après galetage, ont révélé que les vitesses de rotation recommandées pour avoir une dureté élevée et une bonne rugosité de surface sont comprises entre 150 et 230 tr/min. Une force de galetage de 35 kgf est recommandée pour obtenir une meilleure dureté, tandis que pour une bonne rugosité de surface, la force est environ 25 kgf. Enfin pour les meilleurs résultats de rugosité et de dureté de surface une faible avance de galetage et un nombre de passes de l'outil compris entre 3 à 4 passes sont recommandés.

4. CONCLUSION

Le galetage est un traitement mécanique superficiel à froid. Les effets du procédé apportés à l'acier S 355 J0 peuvent se résumer comme suit :

1) le galetage améliore l'état de surface en nivelant les aspérités ; ainsi la rugosité se trouve réduite de 88.5%.

2) Par la déformation plastique qu'il crée, le galetage offre une nouvelle structure par écrouissage des couches superficielles et par conséquent il élève la dureté de 22%.

Ces deux effets sont intimement liés aux paramètres du traitement (F , P , N et f).

3) La modélisation entreprise à partir de la méthodologie de réponse des surfaces et le plan d'expériences composite centré rotatable de deuxième degré de Box-Hunter assure une bonne prédiction des réponses de sorties validés par le test de Fisher et dont la bonne corrélation avec les résultats expérimentaux a été validée avec un coefficient de détermination R^2 de 93,1% et 89,8% pour la rugosité et la dureté respectivement. Il ressort des modèles envisagés que le maximum d'effet du galetage est étroitement lié aux valeurs optimales des paramètres du traitement. Grâce à ces effets, le galetage se distingue des procédés de mise en œuvre par enlèvement de copeaux par le fait qu'il est simple, économique et nécessite peu de temps pour acquérir un bel aspect physico géométrique de surface. Grâce à ces effets, le galetage se distingue des procédés de mise en œuvre par enlèvement de copeaux par le fait qu'il est simple, économique et nécessite peu de temps pour acquérir un bel aspect physico géométrique de surface.

REFERENCES

- [1] Yaltese M.A., Boulanouar L. & Chaoui K., 2004. Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en CBN, Mécanique & Industrie, Vol. 4 (16), 1-14
- [2] Avilés R., Albizuri J., Rodríguez A. & de Lacalle L.L., 2013. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel, International journal of fatigue, Vol. 55, 230-244.
- [3] Hamadache H., Laouar L., Zeghib N.E. & Chaoui K., 2006. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 180 (1-3), 130-136.
- [4] Mendar A.C.E., 1978. La technique du galetage, Métaux et déformation, Vol. 47, 45-56.
- [5] Hassan A.M. & Al-Bsharat A.S., 1996. Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals, Wear, 199 (1), 1-8.
- [6] Dwivedi S.P., Sharma S. & Mishra R.K., 2014. Effects of roller burnishing process parameters on surface roughness of A356/5% SiC composite using response surface methodology, Advances in Manufacturing, Vol. 2 (4), 303-317.
- [7] Khabeery M.M. & El-axir M.H., 2001. Experimental techniques for studying the effects of milling roller burnishing parameter on surface integrity, Machine Tools & Manufacture, Vol. 41 (41), 1705-1719.
- [8] El-axir M.H., 2003. An investigation into roller burnishing, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 23 (40), 603-1617.

- [9] Kudryavtsev P.I., 1983. Surface work-hardening delays fatigue development, Russian Engineering Journal, Vol. 52, 61-65.
- [10] Hassan A.M. & Momani A.M., 2000. Further improvements in some properties of shot peened components using the burnishing process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40 (12), 1775-1786.
- [11] Fattough M. & El-Khabeery M.M., 1989. Residual stress distribution in burnishing solution treated and aged 7075 aluminium alloy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 29 (1), 153-160.
- [12] Chomienne V., Valiorgue F., Rech J. & Verdu C., 2016. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel, CIRP Journal of Manufacturing Science & Technology, Vol. 13, 90-96.
- [13] Lemerrier M., 1978. Emploi rationnel du galetage fin des surfaces, Techniques Industrielles, Vol. 92, 69-79.
- [14] El-Tayeb N.S.M., Low K. O. & Brevern P.V., 2007. Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 186 (1), 272-278.
- [15] Wagner L., Ludian T. & Wollmann M., 2009. Ball-burnishing and roller-burnishing to improve fatigue performance of structural alloys, Engineering Against Fracture, Springer Netherlands, 1-11.
- [16] Chevalier A. & Bohan J., 1979. Guide du technicien en fabrication mécanique. Ed. Hachette technique. 255p.
- [17] Salahshoor M., & Guo Y.B., 2011. Surface integrity of biodegradable Magnesium-Calcium orthopedic implant by burnishing, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 4 (8), 1888-1904.
- [18] Low K.O., & Wong K.J., 2011. Influence of ball burnishing on surface quality and tribological characteristics of polymers under dry sliding conditions, Tribology International, Vol. 44 (2), 144-153.
- [19] Klocke F. & Liermann J., 1998. Roller burnishing of hard turned surfaces, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 38 (5), 419-423.
- [20] Shiou F.J. & Chen C.H., 2003. Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140 (1), 248-254.
- [21] Hassan A.M., Al-Jalil H.F. & Ebied A. A., 1998. Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 83 (1), 176-179.
- [22] Loh N.H., Tam, S.C., & Miyazawa, S., 1990. Surface hardening by ball burnishing, Tribology International, Vol. 23 (6), 413-417.
- [23] Travieso-Rodriguez J.A., Gomez-Gras G., Desein G., Carrillo F., Alexis J., Jorba-Peiro J. & Aubazac N., 2015. Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81 (9-12), 1757-1765.
- [24] Tian Y., & Shin Y.C., 2007. Laser-assisted burnishing of metals, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47 (1), 14-22.
- [25] Segawa T., Sasahara H. & Tsutsumi M., 2004. Development of a new tool to generate compressive residual stress within a machined surface, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44 (11), 1215-1221.
- [26] El-Axir M. H., Othman O.M. & Abodierna A.M., 2008. Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 202 (1), 435-442.
- [27] Revankar G.D., Shetty R., Rao S.S. & Gaitonde V.N., 2014. Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy, Measurement, Vol. 58, 256-268.
- [28] Yuan X.L., Sun Y.W., Gao L.S. & Jiang S.L., 2016. Effect of roller burnishing process parameters on the surface roughness and microhardness for TA2 alloy, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 85 (5-8), 1373-1383.
- [29] MRE U. U. N. & NAPOVED Z., 2008. Use of artificial neural networks in ball burnishing process for the prediction of surface roughness of AA 7075 aluminum alloy, Materiali in Tehnologije, Vol. 42 (5), 215-219.
- [30] Bougharriou A., Saï W.B. & Saï K., 2010. Prediction of surface characteristics obtained by burnishing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 51 (1-4), 205-215.
- [31] Box G.E. & Hunter J.S., 1957. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces, The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 28, 195-241.
- [32] Goupy J. & Creighton L., 2006. Introduction aux plans d'expériences. Ed. Dunod. 336p.
- [33] El-Axir M. H., 2000. An investigation into roller burnishing, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40 (11), 1603-1617.