

دراسة تجريبية لتأثير نوع عملية الصقل على السلوك الميكانيكي للفولاذ الكربوني

*م. محسن عدرة

ملخص

تتعرض الأجزاء التي تعمل في ظروف تلامس لتدهور ناتج عن ظاهرة التآكل. لذلك، فهي تتطلب مواد ذات خصائص عالية للطبقات السطحية ونطاق تصنيع متقدم للغاية. يمكن لعمليتي الصقل بالكرة والصقل بالدحرج أن تمنح المادة مظهراً سطحياً جديداً سواء من الناحية الميكروهندسية أو الفيزيائية. يهدف هذا العمل إلى تحديد تأثيرات كل من هاتين العمليتين على خصائص الفولاذ الكربوني. بالإضافة إلى ذلك، تم دراسة تأثيرات مختلف معايير نظام التشكيل على الخشونة والصلابة. حيث أظهرت النتائج أن المظهر السطحي الجديد المطلوب يتميز بمؤشر تقني اقتصادي ملحوظ. حيث تتصرف الطبقات السطحية المعالجة كسطوح مصقولة مع خشونة Ra تتراوح بين 0.22 و 0.9 مايكرومتر ومعالجة بالتصليد مع صلادة HRB تتراوح بين 87 و 90. هذه التأثيرات المثلثة تنتج عن نظام عمل محدد لكل خاصية ولكل عملية. وهذا يسمح بتحسين مقاومة التآكل لهذه الطبقات بنسبة تصل إلى حوالي 98% وتصنيفها كأسطح مصقولة.

كلمات مفتاحية: التشغيل ، الخشونة ، الصلابة ، التآكل ، الصقل بالدحرج ، الصقل بالكرة.

- حاصل على شهادة الماجستير 2023 في اختصاص المعدات والآليات -كلية الهندسة التقنية-جامعة طرطوس-سورية

Experimental study of the effect of polishing process type on the mechanical behavior of carbon steel

Abstract

Parts operating in contact conditions are subjected to corrosion-induced degradation. Therefore, they require materials with high surface properties and a very advanced manufacturing range. Ball and roller polishing processes can give the material a new surface appearance both from a micro-engineering and a physical point of view. This work aims to determine the effects of each of these two processes on the properties of carbon steel. In addition, the effects of different farming system parameters on roughness and hardness were studied. The results showed that the required new surface appearance has a remarkable techno-economic index. The treated surface layers behave as polished surfaces with a Ra roughness between 0.22 and 0.9 μm and as hardening-treated with an HRB hardness between 87 and 90. These optimum effects result from a specific working system for each property and each process. This allows us to improve the corrosion resistance of these layers by up to about 98% and classify them as polished surfaces.

Keywords: machining, roughness, hardness, wear, roller polishing, ball polishing.

1 المقدمة:

تعتبر عمليات التشكيل من أهم العمليات التي تستخدم في الصناعة ومن أجل ضمان إنهاء قطعة ما، غالباً ما يتم اللجوء إلى سلسلة من عمليات التشغيل النهائية [1] التي قد تتطلب في بعض الأحيان تكلفة مرتفعة. وبناءً على ذلك، تعتبر الطبقات السطحية، هي الأكثر تعرضاً للإجهاد أثناء الخدمة، وايضاً الأكثر تعرضاً للتآكل نتيجة للتفاعل مع الأجزاء المتزاوجة أو مع البيئة المحيطة [2]. تحت تأثير الاحتكاك، تتعرض هذه الطبقات للتآكل [4-5]. حالياً، يتم فقدان 50% من الطاقة المقدمة بسبب الاحتكاك الناتج عن الحركة النسبية بين عناصر الآلات. وفي الوقت الحاضر، تتطلب عمليات التحسين وتعزيز المواد التي تتعرض للإجهاد الشديد استخدام طرق حديثة تشمل المعالجة الميكانيكية مثل الصقل بالدحروج [6]. أو الصقل بالكرة [7]. حيث تعمل هاتان الطريقتان على تطبيق تشوه لدن (التشكيل بالبارد) على الطبقات السطحية، وتؤثران على الخصائص الهندسية والفيزيائية على حد سواء.

تختلف البارامترات المؤثرة على هذه العمليات ، ويمكن تلخيصها عادةً بالعناصر المتعلقة بنظام العمل مثل السرعة، والتغذية، وجهد التشكيل، وعدد التمريرات [7-8-11]. وفي كثير من الأحيان، يتم إدخال بارامترات أخرى مثل: عمق التغلغل [7]، وتوقيت العملية [9]، أو حتى الحالة الأولية للطبقات السطحية [12-13]. كما يتم أحياناً أخذ شكل الأداة وهندستها في عين الاعتبار [7-14].

تتمحور الاستجابات الناتجة بشكل أكبر حول مظهر السطح [8-15]، وحالة الإجهادات المتبقية على السطح [9-12-15]، وبشكل أكثر تحديداً، مقاومة الطبقات السطحية. حيث أظهرت بعض الدراسات أنه يمكن تحقيق نتائج مثيرة للاهتمام في ظروف معينة فيما يتعلق بالخصائص الميكانيكية مثل خشونة السطح وصلابته [7-14-15] أو مقاومته للتآكل [5]. بالإضافة إلى هذه التأثيرات الإيجابية، فإن الصقل بالكرة والصقل بالدحروج يسببان ضغوطاً متبقية ، حيث يمكن تحديد القيم القصوى على عمق يتراوح بين 40 إلى 200 ميكرومتر [9-18-20]. وهذا يؤدي إلى تحسين جيد

في مقاومة بدء وتطور الشقوق [18]، وبالتالي تحسين في مقاومة التعب بنسبة تتراوح بين 10 إلى 300% [19]. ومع ذلك، فإن هذه النتائج مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بظروف العمل التي قد تكون محدودة أحياناً بتصميم الأدوات [17]، والمواد المراد معالجتها [17-18]، والحالة الأولية لهذه الطبقات والتي يؤثر عليها فعالية المعالجة [7-20].

2 المواد وطرائق البحث:

2.1 المواد

المادة المدروسة هي فولاذ متوسط الكربون. حيث أظهرت التحاليل الكيميائية التركيب الذري لهذا الفولاذ المستخدم، الجدول (1):

الجدول (1): التركيب الكيميائي للفولاذ متوسط الكربون

العن صر	V	Mo	Ni	Cu	Cr	Fe	P	S	Si	Mn	C
المح توى (%)	0.51	1.61	0.15	0.08	4.78	0.60	0.021	0.03	0.16	1.25	0.34

وتم أيضاً إجراء اختبار الشد على ثلاثة قضبان من الفولاذ، وذلك بهدف الحصول على بعض القيم للخصائص الميكانيكية من خلال أخذ القيمة المتوسطة. حيث وجدنا أن:

$$Re = 447,4 \text{ MPa, (حد المرونة)}$$

$$Rr = 612,5 \text{ MPa (مقاومة الكسر)}$$

$$A\% = 13,5 \text{ \% (الاستطالة عند الكسر)}$$

Ex=210 Gpa (معمل يونغ)

من أجل تطبيق عملية التلميع، تم تحضير قضبان أسطوانية من خلال عملية الخراطة باستخدام أداة قطع من كربيد معدني من درجة M20. حيث يتميز السطح الناتج من عملية الدوران بخشونة $(Ra = 1.9-3.64 \mu m)$ وصلادة $(HRB = 80-86)$ ، بعد الدوران يتم تقسيم العينة إلى جزئين. الجزء الثاني مخصص، حسب الحالة، لخضوعه لعملية الصقل بالكرة أو الصقل بالدحروج. وأخيراً، يتم تطبيق اختبار التآكل على كل من الجزئين.

2.2 الأجهزة والطرق التشغيلية:

2.2.1 جهاز المعالجة الميكانيكية

يمكن تنفيذ عمليات الصقل بالكرة والصقل بالدحروج باستخدام جهاز واحد مصمم خصيصاً لهذا الغرض؛ حيث يتم تغيير الجزء النشط فقط حسب الحالة. يتميز هذا الجهاز ببساطة التركيب على البرج في آلة الخراطة العامة الشكل (1-a)، وبناءً على ذلك، فإن الصقل بالكرة باستخدام رأس ماسي بنصف قطر $rp = 1.5mm$ يحاكي عملية الخراطة؛ ويتم الحصول على حركة التشكيل من خلال تدوير القطعة، بينما يتم نقل حركة التقدم إلى الأداة عبر النقل الطولي الشكل (1-b)، بالمقابل فإن الصقل بالدحروج يتم باستخدام الأسطوانة الدوارة بقطر $dG = 36mm$ ، فيحاكي عملية التنعيم الأسطواني؛ وبالتالي، يتطلب أيضاً حركة دورانية للأسطوانة. في كلا الطريقتين، يتمثل حركة التوغل في تأثير الرأس الماسي أو الأسطوانة الدوارة التي تمارس على القطعة جهداً P من التشكيل يتم ضبطه مسبقاً على الجهاز بالإضافة إلى ذلك يتم تنفيذ التلميع، تماماً مثل التشكيل، في ظروف تزييت وفقاً لنظام موصى به يعتمد على الصلابة الأولية. حيث بارامترات هذا النظام موضحة في الجدول (2).

لتقدير تأثير هذه البارامترات، تم إجراء الاختبارات تحت أنظمة مختلفة، حيث تُحدد مجموعة البارامترات الجدول (3) بواسطة طريقة التخطيط متعددة العوامل للتجارب.

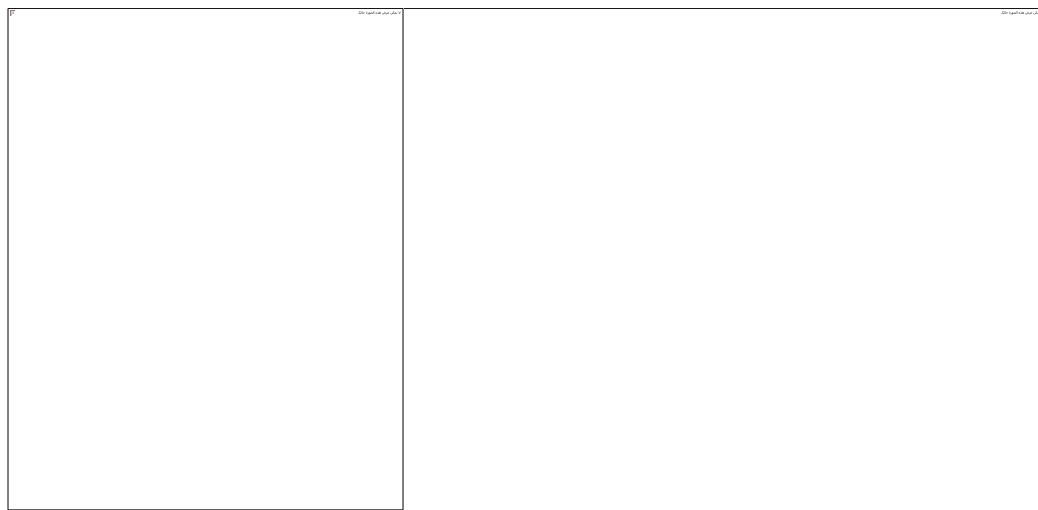
2.2.2 اختبار التآكل

الغرض من هذه الاختبارات هو تقدير مقاومة المادة للتآكل بعد عملية التفرير أو بعد خضوعها لإحدى عمليات التشكيل. يحدث ظاهرة التآكل من خلال التآكل الثلاثي، حيث يتم حقن جزيئات من المادة الكاشطة، المنقولة بواسطة زيت التشحيم، في منطقة التلامس بين الأداة والقطعة. حيث تجرى الاختبار على مخروطية موازية باستخدام جهاز كما يبين في الشكل (2)، مزود بمحمل يطبق ضغطاً خفيفاً على القطعة. بمجرد تأسيس التلامس، يتم تشغيل المحمل لتدويره، مما يتسبب في احتكاك مع القطعة التي تم تحديد سرعة تدويرها عند 500 دورة في الدقيقة. في كل اختبار، يتم ضبط الوقت وقياس وزن العينة باستخدام ميزان دقيق.

يتم تسجيل فقدان الكتلة Δm على السطح، والذي يمثل الفرق بين الكتلة m_{i-1} قبل الاختبار و m_i بعد الاختبار. يتم تقييم القيمة التراكمية لـ Δm باستخدام العلاقة:

$$\Delta m = m_{i-1} - m_i + \Delta m_{i-1}$$

تُميز قيمة Δm فعلياً التآكل الناتج عن تلامس الأداة-المادة الكاشطة-القطعة خلال فترة زمنية محددة. وقد تم اختيار العينات المستخدمة في اختبارات التآكل بناءً على أفضل قيم الخشونة والصلابة الناتجة عن كل من عمليتي التشكيل.

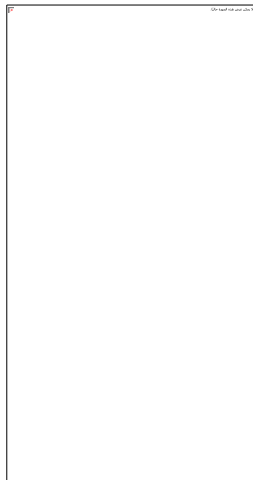
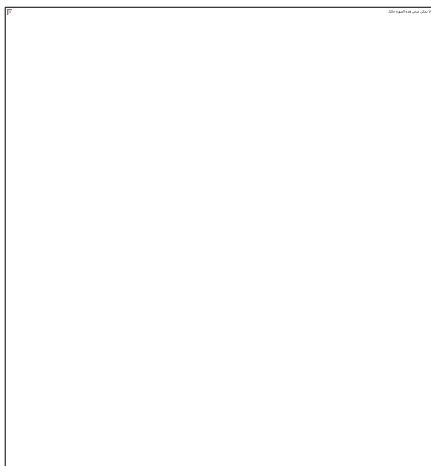


الشكل (1). جهاز التشكيل (a) صورة لتركيب الجهاز على المخرطة، (b) مخطط عملية التلميع:
1- قضيب؛ 2- الماسك؛ 3- الجسم؛ 4- غلاف التوجيه؛ 5- الزنبرك؛ 6- المكبح؛ 7- برغي التعديل؛ 8-
اللوحة.

الجدول (2). أنظمة العمل في المعالجة الميكانيكية.

الأختبار N	بارامترات				
	V(m.min ⁻¹)	n (tr.min ⁻¹)	P (kgf)	f (mm.tr ⁻¹)	l (شوط)
1	10	180	20	0,075	2
2	45	710	20	0,075	2
3	80	1000	20	0,075	2
4	45	710	20	0,05	2

5	45	710	20	0,075	2
6	45	710	20	0,100	2
7	45	710	05	0,075	2
8	45	710	15	0,075	2
9	45	710	20	0,075	2
10	45	710	15	0,075	1
11	45	710	15	0,075	2
12	45	710	15	0.075	3



الشكل (2). جهاز اختبار التآكل. (1) الجسم؛ (2) الحلقة؛ (3) المحمل؛ (4) الحلقة؛ (5) واشر التثبيت؛ (6) صامولة M8؛ (7) المحور؛ (8) صامولة M8؛ (9) واشر

3. النتائج

3.1 تأثيرات المعالجات

المظهر الأولي للطبقات السطحية هو نتيجة عملية الخراطة، حيث تم تحديد نظام القطع الأمثل باستخدام التحجيم لتحقيق خشونة أولية قدرها 3.2 ميكرومتر. تعتبر هذه الحالة الجيومترية موصى بها [7]. ولذلك لتحقيق أفضل فعالية للمعالجة. وبناءً على ذلك، قُدِّمت التوليفات المختلفة للبارامترات المعالجة خشونة Ra تتراوح بين 0.22 و 0.9 ميكرومتر وصلابة HRB تتراوح بين 87 و 90 كما يوضح في الجدول (3). وبناءً على ذلك، فإن أقصى تأثير يتم تحقيقه على كل من الخصائص المذكورة كما يوضح في الشكل (3)، بينما النظام يتطلب عمل محدد لكل معالجة.

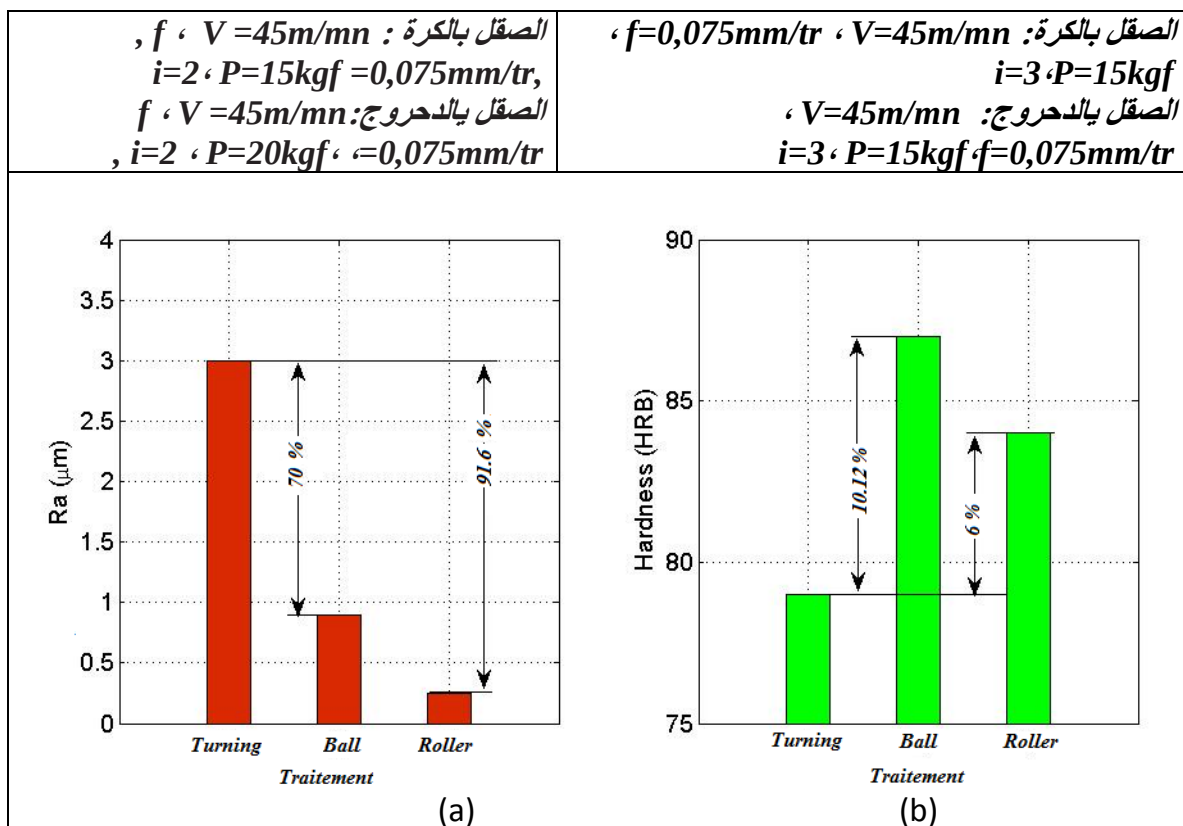
من خلال عملية الصقل بالكرة، ومع ثبات السرعة $V = 45 \text{ m.min}^{-1}$ ، والجهد $P = 15 \text{ daN}$ ، وسرعة التغذية $f = 0,075 \text{ mm.tr}^{-1}$ ، حيث تتيح المعالجة بثلاث تمريرات تحسين الصلابة بنسبة تقارب 10-12%. بالمقابل، إذا تم تقليص المعالجة إلى تمريرين فقط، فإن الخشونة Ra تتحسن بنسبة تقارب 70%.

في حالة التدوير، يعتبر النظام الأكثر فائدة من حيث Ra و HRB هو أيضاً محدد بواسطة القيم المتوسطة لـ V و f ، وبناءً لذلك عند دمج هذه القيم مع جهد قدره 20 daN في تمريرين (شوطين)، تتحسن الخشونة بنسبة 92%. وعلى العكس، عندما يتم تقليص جهد التشكيل إلى 15daN ويزداد عدد الأشواط إلى ثلاث، فإن الصلابة تزيد بنسبة تصل إلى 6%.

الجدول (3) . تأثير الصقل بالدحروج و الصقل بالكرة على الخشونة والصلابة

N	Ra [μm]					[HRB]				
	بعد الخراطة	بعد الصقل بالكرة	الفرق (%)	بعد الصقل بالدحروج.	الفرق (%)	بعد الخراطة	بعد الصقل بالكرة	الفرق (%)	بعد الصقل بالدحروج	الفرق (%)
1	2,4	1,9	20,83	0,32	86,66	82	87	6,09	86	4,87

2		1,6	33,33	0,29	87,91		85	3,65	85	3,65
3		1,5	37,50	0,22	90,83		84	2,43	84	2,43
4	1,8	1,1	38,88	0,22	87,77	83	89	7,22	85	2,40
5		1,4	22,22	0,25	86,11		85	2,40	85	2,40
6		1,6	11,11	0,37	79,44		84	1,20	85	2,40
7	3,0	1,1	63,33	1,84	38,66	83	85	2,40	83	0,00
8		0,9	70,00	0,39	87,00		86	3,61	85	2,40
9		1,1	63,33	0,25	91,66		90	8,43	87	4,82
10	1,9	1,8	05,26	0,46	75,78	79	84	6,32	82	3,79
11		1,4	26,31	0,30	84,21		85	7,60	83	5,06
12		1,3	11,40	0,24	87,36		87	10,12	84	6,32



الشكل (3). تأثير عمليات التشكيل على: الخشونة و القساوة

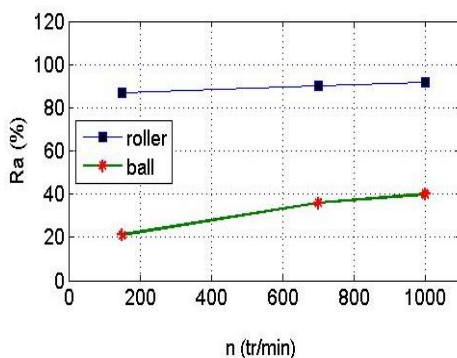
3.2 تأثير نظام المعالجة

يوضح الشكل (4) تأثير البارامترات المعالجة على معدل زيادة الخشونة بعد تطبيق الطريقتين. حيث الطريقتان تتأثران بشكل ضئيل بتغير تردد الدوران أو سرعة التقدم كما هو مبين في الشكل (4- a, b)، على الرغم من أن زيادة التقدم تقلل من فعالية الصقل بالكرة. إن زيادة جهد التشكيل وعدد التمريرات أثناء الصقل بالدحروج كما يبين الشكل (4- c-d)، حيث تعزز بشكل أكبر من المظهر الهندسي للسطح، وهذه التحسينات تكون أقل وضوحاً أثناء الصقل بالكرة. لذا، لا يُفضل زيادة هذين المعلمين بشكل مفرط لتجنب تقليل فعالية الصقل بالكرة. بالإضافة يوضح الشكل (5) المنحنيات التي تأثير البارامترات نظام المعالجة على الصلابة تتشابه في كلا الطريقتين. ومن تحليل هذه المنحنيات يتبين أن معدل زيادة الصلابة ينخفض مع زيادة تردد الدوران ، الشكل (5-a) أو حتى

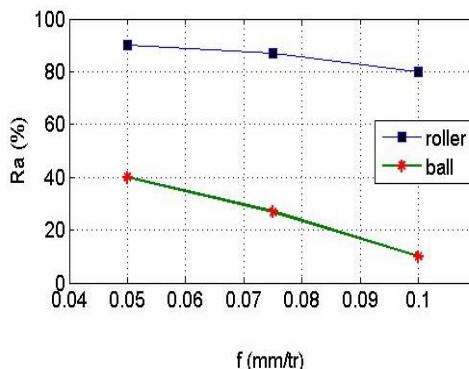
سرعة التقدم كما يوضح في الشكل (5-b). بالمقابل، تساهم زيادة جهد التشكيل كما في الشكل (5-c) وعدد التمريرات الشكل (5-d) في تحسين الصلابة، وتكون هذه التحسينات أكثر وضوحاً بعد الصقل بالكرة.

$f = 0,075 \text{ mm/tr} ; P = 20 \text{ daN} ;$
 $i = 2$
 $R_{ai} = 2,4 \mu\text{m}$

$n = 710 \text{ tr/min} ; P = 20 \text{ daN} ; i = 2$
 $R_{ai} = 1,8 \mu\text{m}$



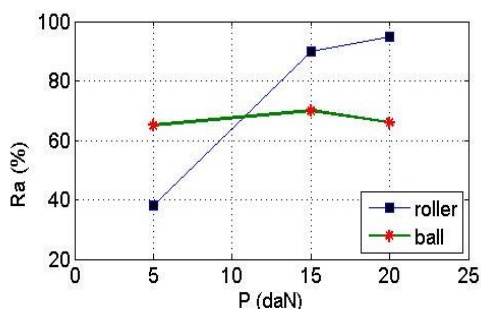
(a)



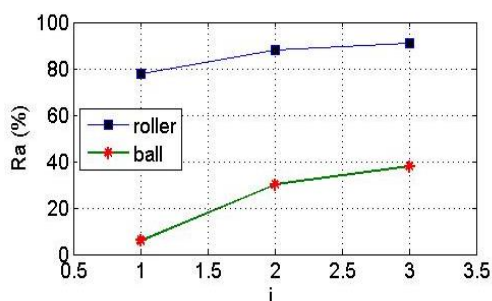
(b)

$n = 710 \text{ tr/min} ; f = 0,075 \text{ mm/tr} ; i = 2$
 $R_{ai} = 3 \mu\text{m}$

$n = 710 \text{ tr/min} ; f = 0,075 \text{ mm/tr} ; P = 15 \text{ daN}$
 $R_{ai} = 1,9 \mu\text{m}$

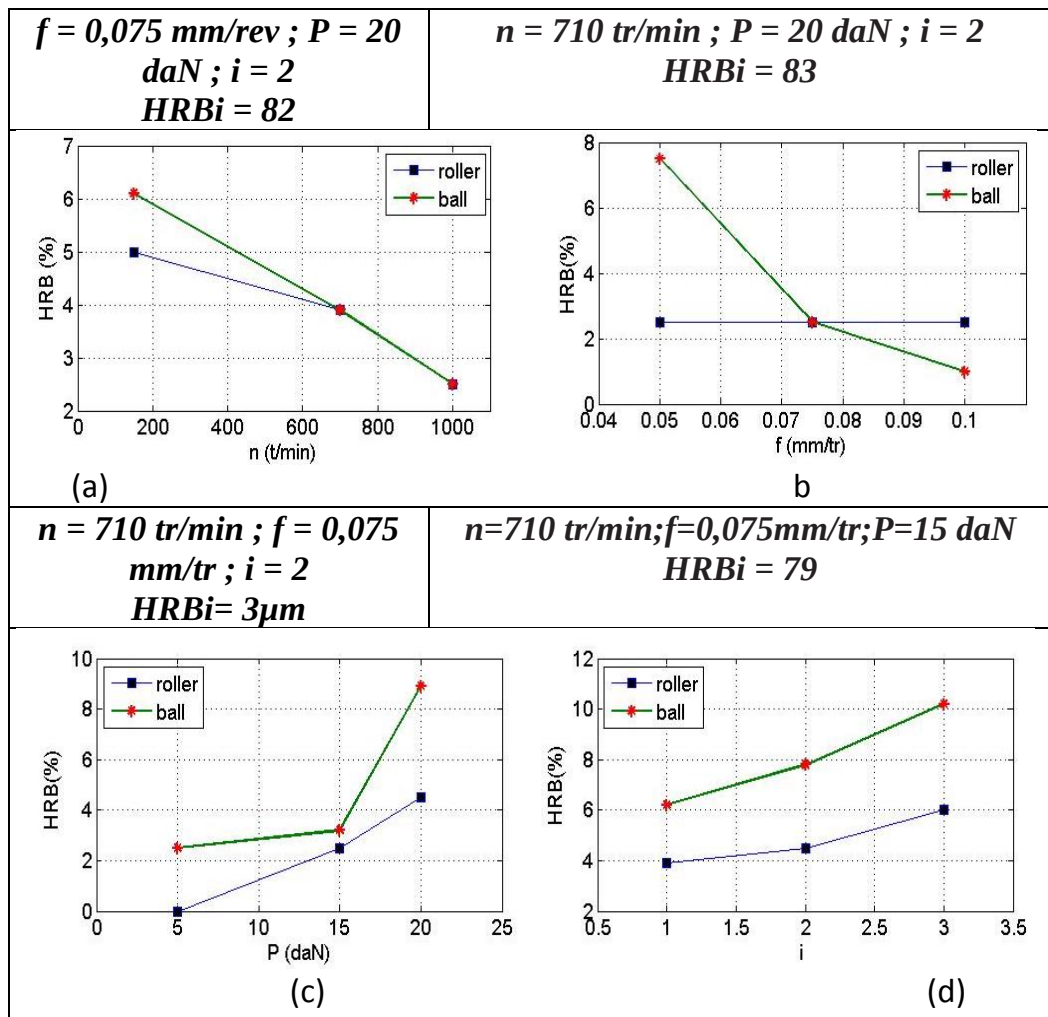


(c)



(d)

الشكل (4). تأثير عناصر نظام المعالجة على نسبة تحسن الخشونة



الشكل (5) . تأثير عناصر نظام المعالجة على نسبة تحسن القساوة

3.3 مقاومة التآكل

تم إجراء التجارب لمدة محددة قدرها 60 دقيقة، حيث كانت الخسارة النسبية في الكتلة ($\Delta m/m_0$) المسجلة على العينات في الحالة المدورة تتراوح بين 1.94% و 3.32%. بعد التدوير، كانت خسارة الكتلة تمثل 0.21% كما يبين في الجدول (4)، بينما بعد الصقل بالكرة انخفضت هذه النسبة إلى 0.05% كما يبين في الجدول (5). في هذه الحالة، تحسن كل من الطريقتين في مقاومة التآكل،

مع كون التحسن أكثر وضوحاً في الصقل بالكرة 98% مقارنة بالصقل التدرج 89% كما في الشكل (6)، بينما يوضح الشكل (7) تطور التآكل مع مرور الوقت، بينما تكشف منحنيات التآكل عن القوانين الكلاسيكية للتآكل، حيث يمكن تسليط الضوء على المراحل الثلاث الكلاسيكية للتآكل.

المرحلة الأولى، التي تتميز بصقل نتوءات الخشونة، تظهر حتى الدقائق العشرين الأولى من التجربة، وهذه المرحلة تكون أكثر تسارعاً أثناء الصقل بالدحرج. المرحلة الثانية تمثل التآكل النظامي الطبيعي، حيث يتطور بشكل أكثر أو أقل وفقاً لقانون خطي. المرحلة الثالثة تميز نفسها بعد مرور 60 دقيقة من التجربة، حيث تتسارع خسارة الكتلة بشكل ملحوظ، مما يشير إلى أن التآكل دخل في نطاقه الكارثي. مما يؤدي الى تتدهور المادة بشكل شديد عند ملاستها للأداة.

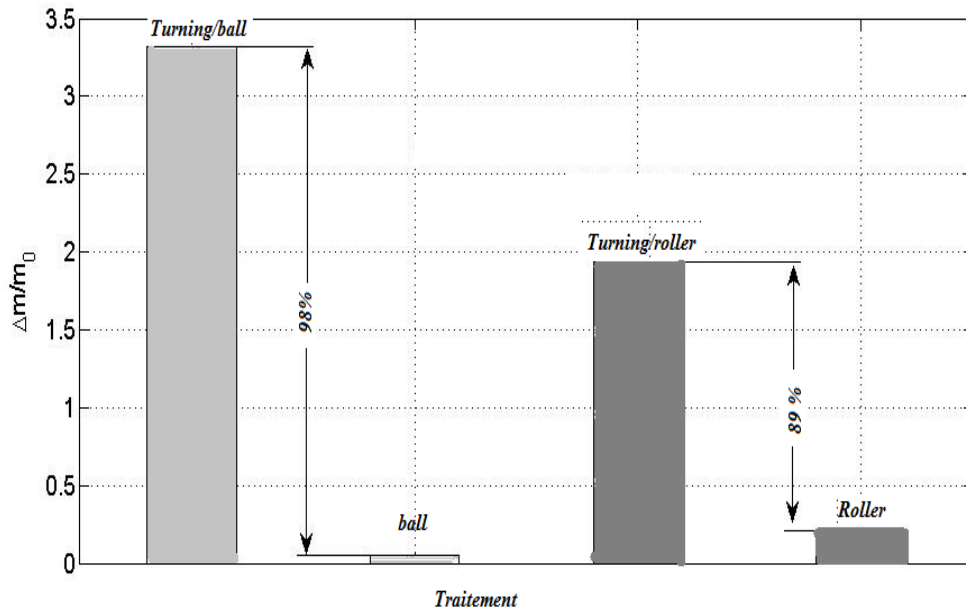
الجدول (4). نتائج اختبارات التآكل بعد الصقل بالدحارج

N °	Δt_i [min]	$t_{i-1} + \Delta t$ [min]	m_i (g)	Δm_i (g)	$\Delta m_i/m_0$ (%)	m_i (g)	Δm_i (g)	$\Delta m_i/m_0$ (%)
			خرطة $m_0 = 77,8380 \text{ g}$			صقل الدحارج $m_0 = 78,0053 \text{ g}$		
01	10	10	77,496 0	0,342 0	0,440	78,002 4	0,002 9	0,004
02	5	15	77,349 6	0,488 4	0,627	78,001 0	0,004 3	0,005
03	5	20	77,096 0	0,742 0	0,953	77,947 2	0,058 1	0,074
04	5	25	77,084 2	0,753 8	0,970	77,933 5	0,071 8	0,092
05	5	30	76,979 0	0,859 0	1,103	77,924 3	0,081 0	0,104
06	10	40	76,852 0	0,986 0	1,266	77,900 1	0,105 2	0,134
07	5	45	76,435 0	1,403 0	1,802	77,894 7	0,110 6	0,142

08	5	50	76,4240	1,4140	1,816	77,8625	0,1428	0,183
09	5	55	76,3974	1,4406	1,850	77,8909	0,1444	0,185
10	5	60	76,3231	1,5149	1,946	77,8380	0,1673	0,214

الجدول (5). نتائج اختبارات التآكل بعد الصقل بالكرة

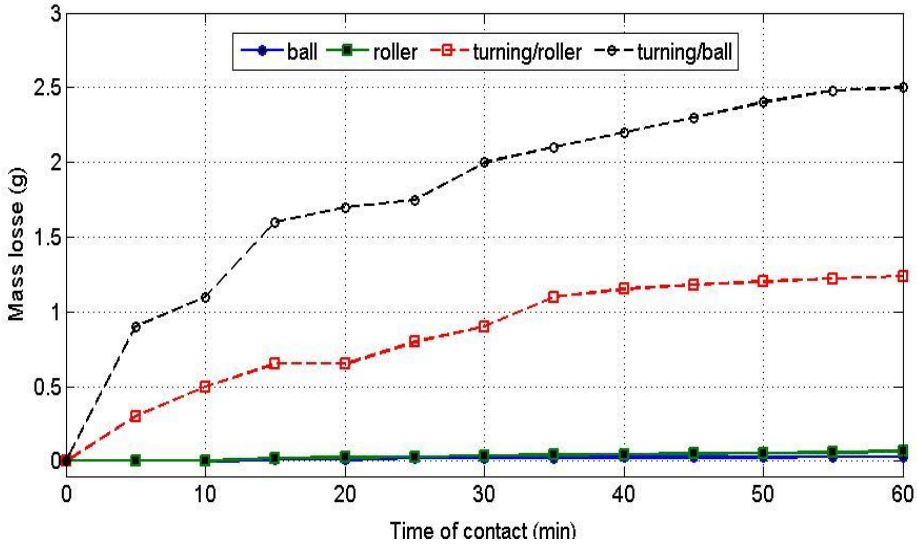
N °	Δt_i [min]	$t_{i-1} + \Delta t$ [min]	m_i (g)	Δm_i (g)	$\Delta m_i/m_0$ (%)	m_i (g)	Δm_i (g)	$\Delta m_i/m_0$ (%)
			$m_0 = 71,8800$ g خراطة			$m_0 = 71,9180$ g صقل بالكرة		
01	10	10	70,9850	0,8950	1,245	71,9153	0,0027	0,004
02	5	15	70,6820	1,1980	1,666	71,9129	0,0051	0,007
03	5	20	70,1933	1,6867	2,346	71,9123	0,0057	0,008
04	5	25	70,0831	1,7969	2,500	71,9104	0,0076	0,010
05	5	30	70,0725	1,8075	2,514	71,9100	0,0080	0,011
06	10	40	69,9730	1,9070	2,653	71,9097	0,0083	0,011
07	5	45	69,7402	2,1398	2,977	71,9031	0,0149	0,021
08	5	50	69,6402	2,2398	3,116	71,8980	0,0200	0,028
09	5	55	69,5382	2,3418	3,258	71,8913	0,0267	0,037
10	5	60	69,4892	2,3908	3,326	71,8800	0,0380	0,053



الشكل (6). تأثير المعالجة على مقاومة التآكل.

الصقل بالكرة: $i=2$, $P=20$ daN, $f = 0,05$ mm/tr, $V = 10$ m/mn

الصقل بالدحروج: $i=2$, $P=20$ daN, $f = 0,05$ mm/tr, $V = 10$ m/mn



الشكل (7). تطور فقدان الكتلة مع مرور الوقت. نظام المعالجة

4 المناقشة:

4.1 تحليل النتائج

تعمل عمليات التشكيل على تنفيذ التشوه اللدن للطبقات السطحية وتعديل بعض الجوانب الفيزيائية والهندسية لهذه الطبقات. يؤدي هذا التشوه إلى تسوية قمم الخشونة الناتجة عن التشغيل الميكانيكي لملء تجاويف والأخاديد. بشكل أفضل. هذه القمم التي تم تسويتها بفعل مرور الأدوات تترك خلفها سطحاً مصقولاً تماماً بخشونة مماثلة لتلك التي توفرها عمليات التشغيل النهائية التقليدية.

تعتبر أهمية نصف قطر الصقل التدرج مقارنة بنصف قطر أداة الصقل بالكرة ومساحة التلامس بين الأداة والقطعة من العوامل التي تجعل الكرة أكثر فعالية في تسوية الخشونة وتحسين حالة السطح (تقليل Ra بحوالي 90 %) هذا التحسن يكون أقل وضوحاً عند الصقل بالكرة، حيث كانت نسبة تقليل الخشونة حوالي 70%. في الواقع، فإن طرف الأداة الماسي يتفاعل مع القطعة بطريقة مشابهة لأداة القطع، ويكون تأثير التطبيق الموضعي للأداة أقل فعالية مقارنة بالصقل بالكرة. كما

يتضح من تحليل النتائج أن الحصول على خشونة مثالية يعتمد على حالة السطح الأولية (نتيجة عملية الدوران) وأيضاً على النظام الخاص المطبق أثناء المعالجة.

في الواقع، أفضل النتائج التي توفر أقل خشونة قبل وبعد المعالجة تم تسجيلها عندما كانت خشونة السطح الأولية حوالي 3 ميكرومتر الشكل (a-3)، وهي قيمة تتوافق مع القيم التي أوصت بها بعض الدراسات

[7-11]. وهذا ينطبق على كل من الصقل بالكرة والصقل بالدحرج.

للحصول على خشونة سطح مثالية، تختلف الأنظمة الخاصة بكلتا العمليتين فقط في اختيار قوة التشكيل P حيث يتم تحقيق أفضل تأثير عند قوة 15 daN أثناء الصقل بالدحرج الشكل (4-c). يبدو أن مساحة التلامس الصغيرة بين الأداة والقطعة أثناء الصقل بالكرة تسهم في زيادة اختراق الأداة للقطعة مع زيادة قوة P. وبالتالي، تزداد صلابة القطعة نتيجة لارتفاع معدل التصليد الناجم عن التشوه للطبقات السطحية. يؤدي تصلب السطح إلى تدهوره عن طريق النقش عند تلامس الأداة، مما يغير من مظهره الذي يحتفظ رغم ذلك بميزة كونه أفضل مقارنة بالحالة الأولية.

أثناء الصقل بالدحرج، تساهم عرض البكرة في زيادة مساحة التلامس مما يؤدي إلى تقليل ضغط التلامس من جهة ومن جهة أخرى إلى تدفق منتظم الأخدود إلى التجايف. من هذه التأثيرات، ينتج سطح ذو خشونة منخفضة. ومع ذلك، طالما أن قوة التشكيل منخفضة ($P < 10 \text{ daN}$) يظل الصقل بالكرة الأداة الأكثر فائدة من حيث الخشونة. لذلك، يظهر الشكل (4-c) تداخلاً بين العمليتين.

بالمقابل يساهم زيادة معدل الدوران ضمن نطاق السرعات المختار في زيادة معدل تحسين الخشونة الشكل (4-a). حيث أن درجة الحرارة في منطقة التشكيل تزداد مع السرعة قبل أن تستقر في لحظة معينة. حيث تميل الطبقات السطحية إلى اكتساب مظهر أكثر لزوجة مما يقلل من الاحتكاك بين الأداة والقطعة وبالتالي تتحسن الخشونة أكثر. يتم الحصول على أفضل نتيجة في الصقل بالكرة نظراً لصلابة الأداة أثناء العمل. ومع ذلك، فإن زيادة معدل الدوران غير مرغوبة بعد حد معين بسبب عدم استقرار الأداة، وانخفاض التشوه اللدن، وعدم كفاية وقت التزبيت [15]، بالإضافة إلى ظاهرة الاهتزاز التي تتسبب في تدهور السطح [14]. إذ إن زيادة سرعة التقدم كما في الشكل (4-

(b) تزيد من مسافة الخطوط الناتجة عن أداة التشغيل، مما يؤدي إلى تدهور الخشونة. يتأثر معدل التحسن بشكل أكبر بانخفاض الخشونة أثناء عملية الصقل بالكرة. في هذه الحالة، يوفر التشكيل بالدرفلة أفضل النتائج بفضل شكل الأداة (وبالتالي الاتصال بين الأداة والقطعة)، والذي يعمل بطريقة توليد خطية وحركة دوران إضافية للجزء النشط من الأداة، مما يساهم في تسوية أفضل للخشونة. بالإضافة إلى زيادة عدد التمريرات تساهم في تحسين معدل تحسين الخشونة الشكل (4-d). يبدو أن تأثير عدد التمريرات مشابه لتأثير جهد التشكيل. ومع ذلك، ليس من المستحسن زيادة عدد التمريرات بشكل مفرط خشية أن يتعرض المادة للإجهاد المفرط بسبب التصلب، مما قد يؤدي إلى تدهور السطح بمجرد تجاوز القدرة على التشوه اللدن للمادة [8].

4.2 تطور الصلادة:

تحسين الصلادة هو نتيجة لتصلب الطبقات السطحية بسبب التشكيل اللدن لها. يعتبر الصقل بالكرة بواسطة رأس الماس أكثر فعالية في تصلب المادة مقارنة بالصقل بالدحرج، على الرغم من أن الصلادة المثلى الناتجة عن العمليتين تكون في نفس المستوى الشكل (5-b). تظهر القيم المثلى مع نفس نظام المعالجة. أثناء الصقل بالكرة، يختلف النظام الخاص بالصلادة المثلى عن ذلك المتعلق بالخشونة فقط من حيث عدد التمريرات، حيث يتغير من 2 إلى 3.

من ناحية أخرى، في حالة التلميع، إذا كان الهدف هو الحصول على خشونة أو صلادة مثالية، يجب مراعاة العاملين الحاسمين P و i . يتم التحكم في تأثير هذين العاملين على الصلادة بنفس الظواهر. يؤدي زيادة جهد التشكيل وكذلك زيادة عدد التمريرات إلى تشكيل المادة بشكل أكبر، مما يؤدي إلى تصلبها عن طريق التشكيل. باستخدام رأسه الماسي، يؤثر أداة الصقل بالكرة بعمق أكبر على الطبقات السطحية ويقدم بالتالي أفضل نتيجة. ومع ذلك، كما هو موصى به [8]. يجب تحديد هذه القيم لتجنب التشعب الزائد للمادة بالتصلب، خوفاً من تطور التشققات الدقيقة في المادة.

بالمقابل فإن زيادة سرعة الدوران وتقدم العمل تقلل من التأثيرات الإيجابية للمعالجتين فيما يتعلق بالصلادة كما يبين بالشكل (5-a, b) يبدو أنه عند السرعات العالية، يكون معدل تشوه المادة غير كافٍ لتعزيزها بشكل كافٍ. وينطبق نفس الأمر على التقدم الذي يرتبط بسرعة الدوران من خلال السلسلة الحركية لآلة التشغيل. مع زيادة السرعة، يتصرف الصقل بالكرة بطريقة مشابهة للصقل بالدحروج، في حين أنه بزيادة التقدم، يمكن ملاحظة تداخل بين العمليتين. عند التقدمات الصغيرة، يكون الصقل بالدحروج أكثر حساسية تجاه الصلادة، بينما يصبح أقل حساسية عند القيم الكبيرة.

4.3 مقاومة التآكل

يبدو أن تحسين مقاومة التآكل كما يبين في الشكل (6) من خلال المعالجتين هو نتيجة مباشرة لنعومة السطح وصلادة الطبقات السطحية الناتجة عن العمليتين [5]. إذ تقع منحنى فقدان الكتلة كما في الشكل (7) الناتج عن عملية الصقل بالكرة أسفل المنحنى الناتج عن عملية التشكيل، مما يفسر أن عملية الصقل بالدحروج توفر أفضل النتائج فيما يتعلق بمقاومة التآكل التي تحسنت بنسبة تصل إلى 98% في هذه الحالة.

الطبقات السطحية المعالجة بالصقل بالكرة أكثر صلادة من تلك المعالجة بالتشكيل، مما يجعلها أكثر مقاومة للتآكل. مما يُفسر أفضل نعومة للسطح الناتجة عن التشكيل بمرحلة التآكل الطفيف على منحنى التآكل الذي يتطابق مع المنحنى الخاص بالصقل بالكرة.

في مرحلة التآكل العادي، تتطور المنحنيات الخاصة بالعمليتين بنفس الطريقة. ويتطور المنحنى المتعلق بالصقل بالكرة بميل أقل حدة مما يؤكد فعالية هذه العملية. بعد هذه المرحلة، تتدهور الطبقة المتصلة تحت تأثير الاحتكاك مع الأداة ويتكثف التآكل بشكل كارثي.

5 . الخلاصة

يُعدّ كل من الصقل بالدحروج والكرة عمليتين ميكانيكيتين لمعالجة الأسطح على البارد من خلال التشوه اللدن للطبقات السطحية. توفر هاتان الطريقتان تلميعاً عبر ضغط المادة. حيث يتسبب هذا

الضغط في حدوث زحف على سطح المادة حيث تتشكل موجة معدنية أمام الأداة وتجدد سطحاً جديداً خلفها. تعمل الطريقتان على تحسين حالة السطح وزيادة الصلابة.

تُعدّ أدنى خشونة سطحية متاحة بواسطة الصقل بالدحروج؛ هذا النتيجة تكون أفضل كلما كانت الخشونة الأولية قريبة من 3 ميكرومتر. في حين أن أفضل نتيجة للصلابة يتم الحصول عليها عبر الصقل بالكرة. وبناءً على ذلك، يتم تنظيم الكفاءة المثلى لكل عملية من خلال نظام محدد حيث تكون العوامل المهمة هي جهد التشكيل وعدد التمريرات. للحصول على خشونة أفضل، يُوصى بتقييد عدد التمريرات إلى 2؛ أما لتحقيق صلابة أعلى، يمكن زيادة هذا العامل إلى 3 تمريرات مع جهد قدره 15 daN. يؤثر جهد التشكيل على الخشونة، مما يؤدي إلى تفاعل بين الطريقتين ضمن حدود النطاق المختار.

في ظل ظروف الاختبار هذه، على الرغم من أنها تسعى لتحقيق الإنتاجية وكفاءة العملية، إلا أن زيادة السرعة والتقدم لا تؤثر بشكل كبير على الخشونة والصلابة. كما تتصرف الطبقات السطحية المعالجة بالصقل بالكرة والصقل بالدحروج كأنها أسطح مصقولة وتظهر مقاومة جيدة للتآكل، كما يُعدّ لصقل بالكرة أكثر فائدة في هذا السياق.

6. المراجع:

- [1] Liao .L, Zhang .Z, Liu. J, Li .Y, Cui. X, Liu .L ,2020- A novel process of chemical mechanical polishing for FV520B steel. Journal of Manufacturing Processes, 51–57P.
- [2] Maximov. J , Duncheva . G, Anchev .A, Dunchev. V , Anastasov.K and Daskalova .P ,2024- Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Surface Integrity of AISI 316 Steel: Theoretical and Experimental Comparative Analysis, MDPI ,machines, 12-51P. doi.org/10.3390/machines12010051.
- [3] Dwivedi, D.K. Surface Engineering2018. In Enhancing Life of Tribological

Components; Korzynski, M., Ed.; Springer: New Delhi, India,;
ISBN 978-81-322-3779-2.

- [5] A.M. Hassan, A.D. 1999-Suleiman, Improvement in the wear resistance of brass components by ball burnishing process, J. Mater. Process. Technol. 96 . 73–80p.
- [6] Maximov, J.T.; Duncheva, G.V.; Anchev, A.P.; Dunchev, V.P. 2020-Slide burnishing versus deep rolling A comparative analysis. Int. J. Mach. Tools Manuf., 110, 1923–1939p.
- [7]. Loh N.H., Tam S.C., Miyazama S, 1990-Surface hardening by ball burnishing, Proc. Engng. vol 23 ,413–417p .
- [8] Hassan A. M, 1997-The effect of ball and roller burnishing on the surface roughness of some non-ferrous metals, J. Mat. Proc. Tech. vol 72 ,385–391p.
- [9] M. Fattouh, M.M. El-Khabeery, Residual stress distribution in burnishing solution treated and aged 7075 Al alloy, Int. J. Mach. Tools Manufact. 29 (1989). 153–160
- [10] V.M. Braslavski, A.A. Baraz, Deformation strengthening of machinery parts, Vestnik Machinostroeniya 63 (1983) 46–51 .
- [11] M.H. El-Axir, An investigation into roller burnishing, Int. J. Mach. Tools Manufact. 40 (2003) 1603–1617 .
- [12] P.I. Kudryavstsev, Surface work-hardening delays fatigue development, Russian Eng. J. LII (1983) 61–65 .
- [13] Maximov, J.T.; Duncheva, G.V.; Anchev, A.P.; Dunchev, V.P.; Argirov, Y.B. 2022-Effect of Diamond Burnishing on Fatigue Behaviour of

- AISI 304 Chromium-Nickel Austenitic Stainless Steel. Materials, vol 15.
- [14] Hassan A.M, 1997-An investigation into the characteristics of burnished cast Al-Cu alloy, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol 37 , 813–821p .
- [15] Khabeery M.M, El-Axir M.H, 2001-Experimental techniques for studying the effects of milling roller burnishing parameter on surface integrity, Mach. Tools Manufact. Vol 41 , 1705–1719p .
- [16] Wang ,K.H, Blunt L.A, Stout K.J, 1998-The 3D characterization of the surface topography of the ballizing process, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol 38 , 419–423 p.
- [17]. El-Axir M.H,. El Khabeery M.M, 2003-Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various material, J. Mat. Proc. Tech. vol 132 , 82–89p .
- [18] Wagner L, 1999-Mechanical surface treatments on Ti, Al and Mg alloys, Mat. Sce. Ingng. A263 , 210–216p .
- [19] Zhang P, Lindemann J, 2005-Effect of roller burnishing on high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80, Scr. Mat. Vol 52 ,1011–1015p .
- [20] . Klocke F, Lierman J, 1998-Roller burnishing of hard turned surfaces, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol 38 , 419–423p .