

Studying the effect of some technological and physical factors on the actual area of contact surfaces of the cylindered availed tightness's

Jihad Baddour*

(Received 21 / 2 / 2019. Accepted 28 / 3 / 2019)

□ ABSTRACT □

In a valid tightness the steady coupled related into the actual area of contact of coupled surfaces which connected with coupled elements, so in this paper study the actual area of cylindered surfaces contacts and modeling the definite equations of the same, also has been analyzed the effected different coefficients such as (hardness, manufacturing method and the parameters of rough contact surfaces), and as a result of the same we can say that the increasing of the hardness plastic at the contact area leading into shrinking of the actual area contacts relatively, by increasing the precisely of manufacturing the surface, the actual area contacts relatively are increasing, and by increasing the nominal diameter (d) for contact surfaces, the actual area contacts relatively decreasing.

Keywords: plastic hardness, actual area of contact, availed tightness, rapprochement of contacting surfaces, contact of rough surfaces.

*Associate Professor- Faculty of Mech. Of Elect. Eng. –Tishreen University –Lattakia-Syria.

دراسة تأثير بعض العوامل التكنولوجية والفيزيائية على المساحة الفعلية لسطوح تماس الوصلات التداخلية الاسطوانية

د. جهاد بدور*

(تاريخ الإيداع 21 / 2 / 2019. قُبل للنشر في 28 / 3 / 2019)

□ ملخص □

في الوصلات التداخلية يتعلق ثبات الوصلة بمساحة التماس الفعلية للسطوح المقترنة لعناصر الوصلة، لذلك تم في هذا البحث دراسة المساحة الفعلية لتمام السطوح الاسطوانية، نمذجة العلاقات المحددة لها وتحليل العوامل المختلفة المؤثرة عليها (القساوة وطريقة التصنيع وبارامترات خشونة السطوح المتماصة)، ونتيجة ذلك تبين أن زيادة قساوة اللدونة في منطقة التماس تؤدي الى تقلص مساحة التماس الفعلية النسبية، بزيادة دقة تشغيل السطح يزداد مقدار مساحة التماس الفعلية النسبية، ويزيادة القطر الاسمي (d) لسطوح الاقتران تتخفف مساحة التماس الفعلية النسبية.

الكلمات المفتاحية: القساوة لللدنة، مساحة التماس الفعلية، الوصلة التداخلية، تقارب السطوح المتماصة، تماس السطوح الخشنة.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

مقدمة

عند تصميم الوصلات التداخلية يكون السؤال الجوهرى عن تحديد التداخل الفعلي δ_e الذي يؤمن ثبات الوصلة، كما هو معلوم فان التداخل الأولي δ للوصلات المشكلة بالضغط ينخفض بعض الشيء نتيجة تشوه نتوءات السطح المتماسة [1].

سعى كثير من الباحثين لإيجاد علاقات تجريبية لتحديد انحراف التداخل الفعلي عن التداخل الأولي. تم اعتبار المتوسط الحسابي لانحراف بروفيل خشونة السطح Ra كنوعية حدية، أو ارتفاع عدم استواء السطح R_z [1]، لكن فعليا تستطيع هذه البارامترات تقريبا فقط أن تقيم الانخفاض الحقيقي للتداخل. تبين الدراسات أن اهمال التماس القاسي للسطوح المقترنة عند الحسابات يقود الى خطأ في الضغط المحسوب على السطوح المقترنة نحو 20% عند التداخل الوسطي، والى 60% عند قيم صغيرة للتداخل، هكذا اهمال يؤدي أيضا الى خطأ في تحديد قوى الاحتكاك وتغيير أبعاد العناصر الحاضنة والمحضونة [2].

أهمية البحث وأهدافه

يتعلق ثبات الوصلات المقترنة عند الحملات المتبادلة، وبالنتيجة قدرة الآلة على العمل بشكل عام بقساوة التماس، الذي بدوره يتعلق مستواه بالتقارب في تماس سطوح العناصر المنحنية، بارامترات خشونة السطوح المتماسة للعناصر، الصفات الفيزيائية والميكانيكية لمواد العناصر، كما يتعلق بالتقارب أيضاً مساحة التماس الفعلية لخشونة السطوح، والتي بدورها تحدد مقاومة التآكل، بارامترات الاحتكاك، ثبات العناصر المقترنة للإزاحة، الاحكام، الموصلية الحرارية وغيرها، لذلك تم في هذا البحث:

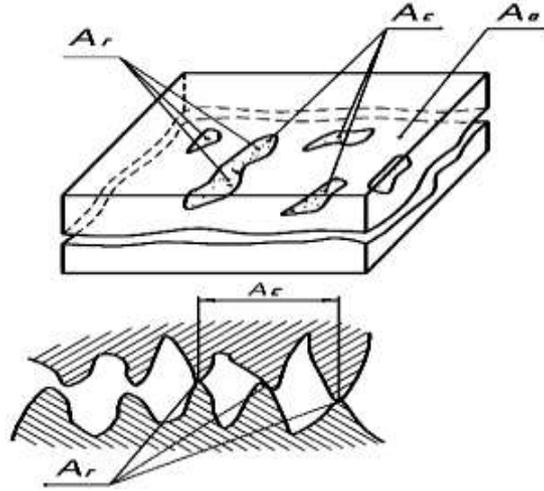
- دراسة المساحة الفعلية للتماس.
- نمذجة العلاقات المحددة لمساحة التماس الفعلية للسطوح الاسطوانية في الوصلات التداخلية.
- تحليل العوامل المؤثرة عليها (القساوة، طريقة التصنيع، عوامل خشونة السطوح المقترنة).

طرائق البحث ومواده

تم في هذا البحث اعتماد طريقة تحليلية علمية استندت على مراجعة كثير من الأبحاث والمنشورات في مجال دراسة ثبات الوصلات التداخلي، مساحة التماس الفعلية للوصلات، علاقة رقم معامل المتانة برقم القساوة وفق برينل وفيكروز، والتقارب في سطوح اقتران الوصلات. استناداً إلى ما سبق تم نمذجة العلاقات المحددة لمساحة التماس الفعلية للوصلات التداخلية للسطوح الاسطوانية ودراسة تأثير بعض العوامل التكنولوجية والفيزيائية عليها.

الدراسة التحليلية:

يختلف التماس الفعلي للسطوح المقترنة عن التماس الاسمي، وبالتالي نميز مساحات التماس للسطوح المقترنة [3]، والموضحة في الشكل (1).



شكل (1). أنواع مساحات التماس
 A_a - مساحة التماس الاسمية، A_c - المحيطية، A_r - الفعلية.

المساحة الاسمية لتماس السطوح المقترنة A_a هي مساحة السطحين المتماسين المعطاة في الرسوم الهندسية. مساحة التماس الفعلية للسطوح المقترنة A_r هي المساحة التي يتحقق فيها تماس النتوءات الميكروية المشكلة للخشونة.

المساحة المحيطية للسطوح المقترنة A_c تتحدد مساحة التماس بوجود انحرافات كبيرة عن استواء السطح وتموجاته.

يمكن تحديد التداخل الفعلي بحساب اقتراب السطوح المتماسة على الشكل التالي [4]:

$$\delta_e = \delta - 2\alpha \quad (1)$$

δ_e - التداخل الفعلي للوصلات المشكلة بالضغط.

δ - التداخل الأولي.

α - التقارب في السطوح الاسطوانية المتماسة لنتوءات السطوح.

في الحالة العامة التقارب الكلي يتألف من جزئين:

التقارب المتبقي h والجزء المنعكس للتقارب المرن α_y [4]:

$$\alpha = \alpha_y + h \quad (2)$$

يتعلق التقارب الكلي α بقساوة السطوح المتماسة، نصف قطر قمة عدم الاستواء، ميزة توضعها على مستويات مختلفة، مجموعة عوامل أخرى.

بما أن قمم نتوءات خشونة السطح متموضعة بمستويات مختلفة، التقارب عند تماس النتوءات المنفصلة يتباين بعضها عن بعض بشكل ملموس.

في بحثنا هذا قمنا باعتبار أن تماس خشونة سطحي المحور والجلبة ناعم لكلا السطحين، ولهما نفس الخشونة [4].

من أجل حساب مساحة التماس الفعلية لجميع خشونة السطح (وليس من أجل نتوءات واحدة منفصلة)، نستخدم العلاقة المحددة للجزء الأولي لمنحني اسناد السطح [5]:

$$\eta_r = \frac{Ar}{Aa} = a_k \cdot b_k \cdot \varepsilon_k^v \quad (3)$$

حيث:

η_r - مساحة التماس الفعلية النسبية.

A_r - مساحة التماس الفعلية.

A_a - مساحة التماس الاسمية.

a_k - ثابت يتعلق بطبيعة تشوه السطوح المقترنة.

b_k, v - ثوابت مرتبطة بعملية التشغيل الميكانيكي للسطح.

ε_k - التقارب النسبي ويحدد على الشكل التالي:

$$\varepsilon_k = \frac{\alpha}{R_{\max}}$$

R_{\max} - الارتفاع الأعظمي لبروفيل السطح.

تم اعتماد دراسة تماس خشونة محور من الفولاذ عالي القساوة مع سطح أسطواني ناعم لجلبة.

يمكن حساب α_y وفق العلاقة [6]:

$$\alpha_y = \sqrt{\frac{9\pi^2 F^2 (K_1 + K_2)^2}{16R \left[1 + \frac{2h}{\alpha_y}\right]}} \quad (4)$$

F - الحمولة الضاغطة للعناصر.

R - نصف قطر العنصر الدائري.

K_1, K_2 - ثوابت متعلقة بطبيعة مرونة مواد السطوح وتحدد على الشكل التالي:

$$K_2 = \frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2} \quad \text{و} \quad K_1 = \frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1} \quad (5)$$

μ_1, μ_2 - ثابت بواسون لمواد العناصر.

E_1, E_2 - معاملات المرونة لمواد العناصر.

أما h فتحدد وفق العلاقة التالية [7,8,9,10]:

$$h = a \cdot R \left(\frac{F^*}{HD_{np} \cdot R^2} \right)^b \quad (6)$$

الفعالة.

[10,9,7]:

$$\frac{1}{HD_{np}} = \frac{1}{K} \left(\frac{1}{HD_C} + \frac{1}{HD} \right) \quad (7)$$

$$HD_{np} = K \cdot \frac{HD_C \cdot HD}{HD_C + HD}$$

حيث:

HD_C : قساوة اللدونة للجلبة.

HD : قساوة اللدونة للمحور.

من أجل تحديد مقدار الثابت K ، تم استخدام الشروط المؤلفة من ان مقدار قساوة اللدونة المحولة من اجل حالات التسطح وغير التسطح يجب ان تأخذ قيمة قساوة مادة العنصر الذي يخضع للتشوه اللدن المرن وبالتالي قساوة اللدونة المحولة للعناصر المتماسة تتحدد بالشكل التالي:

$$HD_{np} = \frac{1.5 HD_C \cdot HD}{HD_C + HD} \quad (8)$$

من أجل حالات غير التسطح أو التسطح تكون علاقة القساوة على الشكل التالي:

$$\left(\frac{HD_C}{HD} = 2, \frac{HD_C}{HD} = 0.5 \right)$$

تأخذ القساوة المحولة قيم قساوة مادة العنصر الذي يخضع لتشوه لدون مرن. أي من اجل التسطح $HD_{np} = HD_C$ من اجل عدم التسطح $HD_{np} = HD$

أيضاً تم تحديد الثوابت b, a وهي مرتبطة بعلاقة قساوة المواد الكروية والمسطحة [7,8,9,10] على الشكل التالي:

$$a = \frac{0.057}{(HD_C/HD)^{1.72}} + 0.142 \quad (9)$$

$$b = 1.306 - 0.153 \left(\frac{HD_C}{HD} \right) \quad (10)$$

اما التقارب الكلي α [7,10] فيعطى بالعلاقة:

$$\alpha = \left(\frac{2\pi F R_{max}^v a^{\frac{1}{b}}}{k \cdot A_a b_k HD_{np} R^{1-\frac{1}{b}} h^{\frac{1}{b}}} \right)^{\frac{1}{v-1}} \quad (11)$$

في الحالة التي يكون فيها $HD_C = 2HD$ من اجل حالة عدم التسطح تأخذ علاقة التقارب الكلي α [4] الشكل التالي:

$$\alpha = \left(\frac{F R_{max}^v}{K \cdot A_a \cdot b_k HD \cdot h} \right)^{\frac{1}{v-1}} \quad (12)$$

يأخذ التقارب من أجل حالة التسطح الشكل التالي [11]:

$$\alpha_c = \left(\frac{2,65 F \cdot R_{max}^v}{K \cdot A_a \cdot b_k \cdot HD_{np} \cdot R^{0,188} \cdot h_c^{0,812}} \right)^{\frac{1}{v-1}} \quad (13)$$

تعطى الحمولة الطبيعية بالعلاقة التالية [12]:

$$F = \frac{\alpha^{v-1} \cdot K \cdot A_a \cdot b_k \cdot HD_{np} \cdot R^{1-\frac{1}{b}}}{2\pi F R_{max}^v \cdot a^{\frac{1}{b}}} \quad (14)$$

$$q = \frac{F}{A_a} = \frac{\alpha^{v-1} \cdot K \cdot b_k \cdot HD_{np} \cdot R^{1-\frac{1}{b}} \cdot h^{\frac{1}{b}}}{2\pi F R_{max}^v \cdot a^{\frac{1}{b}}} \quad (15)$$

إذا كان U_1, U_2 الازاحة القطرية لنقاط السطوح المقترنة للعناصر الحاضنة والمحضونة و δ التداخل الأولي

يكون لدينا:

$$|U_1| + |U_2| = \frac{\delta}{2} \quad (16)$$

عند ذلك $|U_1|$ و $|U_2|$ تتحدد على الشكل التالي:

$$\left. \begin{aligned} |U_1| &= \frac{q \cdot d}{2E_1} \left[\frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} - \mu_1 \right] \\ |U_2| &= \frac{q \cdot d}{2E_2} \left[\frac{1 + \left(\frac{d_2}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_2}{d}\right)^2} - \mu_2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

حيث:

q -الضغط الوسطي المحسوب على السطوح الاسطوانية المقترنة.

d -البعد الاسمي للوصلة.

d_1 -القطر الداخلي للمحور.

d_2 -القطر الخارجي للجلبة.

عند تشكيل الوصلة يحصل غرز لنتوءات السطح في السطح الأملس، نتيجة لذلك يتقلص التداخل الأولي

بمقدار ضعف التقارب الكلي α لذلك العلاقة (16) تأخذ الشكل التالي:

$$U_1 + U_2 = \frac{\delta}{2} - \alpha \quad (18)$$

في بعض الحالات التي يكون فيها المحور عند طرف الجلبة فإن توزيع الضغط على طول السطوح المقترنة

يصبح غير منتظم، ويزداد بالاقتراب من طرف الوصلة. يؤخذ بعين الاعتبار عدم انتظام الضغط بإدخال ثابت لايعدي

x الذي يتحدد بالمنحني المرتبط بـ $\frac{1}{d}, \frac{d_1}{d}$ ، [13].

تصبح العلاقة (18) بعد أخذ العلاقات (15)، (17) بعين الاعتبار على الشكل التالي:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\delta - \frac{c \cdot d \cdot \alpha^{\nu-1} \cdot b_k \cdot HD_{np} \cdot k \cdot R^{1-\frac{1}{b}} \cdot h^{\frac{1}{b}}}{2\pi F \cdot R_{max}^{\nu} \cdot a^{\frac{1}{b}}} \right] \quad (19)$$

حيث c ثابت يتحدد بالعلاقة:

$$c = x \frac{1}{E_1} \left[\frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} - \mu_1 \right] + \frac{1}{E_2} \left[\frac{1 + \left(\frac{d_2}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_2}{d}\right)^2} + \mu_2 \right] \quad (20)$$

c - ثابت يتعلق بالأبعاد الهندسية، وخصائص المرونة للعناصر في الوصلة التداخلية.

مساحة التماس الفعلية مع الأخذ بالحسبان العلاقة (19) تتحدد على الشكل التالي:

$$A_r = A_a \cdot a_k \cdot b_k \cdot \varepsilon^{\nu} = \frac{(h + 0,5 \alpha y) A_a \cdot b_k}{2^{\nu-1} \cdot R_{max}^{\nu}} \cdot \left[\delta - c \cdot d \cdot \alpha^{\nu-1} \cdot k \cdot b_k \cdot HD_{np} \cdot k \cdot R^{1-\frac{1}{b}} \cdot \frac{h^{\frac{1}{b}}}{2\pi F \cdot R_{max}^{\nu} \cdot a^{\frac{1}{b}}} \right] \quad (21)$$

تمت دراسة تماس محور خشن من الفولاذ عالي القساوة مع سطح اسطواني ناعم لجلبة عند المعطيات التالية:

$$q = 20MPa ; d = 40 mm ; d_1 = 10mm ; d_2 = 80mm ; l = 40mm ; \nu = 1.5 ;$$

$$b_k = 1.0 ; R = 35\mu m ; R = 20mm ; E_1 = E_2 = 2.06 \cdot 10^{-6} MPa ;$$

$$\mu_1 = \mu_2 = 0.3 ; HD_c = 1710 MPa ; HP = 3000MPa ; \delta = 40 \mu m$$

d - قطر السطوح المقترنة.

d_2 - القطر الخارجي للجلبة.

d_1 - قطر ثقب المحور.

$b_{R, \nu}$ - ثابت منحنى السطح الاستنادي.

R - نصف قطر قمة النتوء.

R_{max} - الارتفاع الاعظمي لبروفيل السطح.

HD - قساوة اللدونة لمادة المحور.

HD_C - قساوة اللدونة لمادة الجلبة.

نلاحظ أنّ قيمة قساوة لدونة المادة لا يتعلق بمقدار الحمولة وقطر الرأس الغازز الكروي (أي لا يتعلق بشروط الاختبار على القساوة)، وبالتالي يكون ثابت لأجل المادة المدروسة. التفسير الفيزيائي لقساوة اللدونة، ليس الضغط المشروط في التماس (كما هو الحال مثلاً في القساوة حسب برينل HB)، لكن معامل متانة المادة عند الغرز فيها الرأس الكروي أي معامل متانة التماس. نبين في الجدول (1) العلاقة بين قساوة اللدونة HD وأرقام القساوة الأخرى [4,6].

جدول (1). العلاقة بين HD وأرقام القساوة الأخرى.

رقم القساوة	HD MPa - معامل متانة المادة
HRC, (HRC \geq 32)	$3,57 \cdot 10^{-4} \cdot HRC^{4,05} + 3353$
HRB	$88300 / (130 - HRB)$
HB MPa, (HB \leq 4000)	$0,468 HB^{1,124}$
HV MPa, (HV 1000 ... 9200)	$0,5 HV^{1,113}$

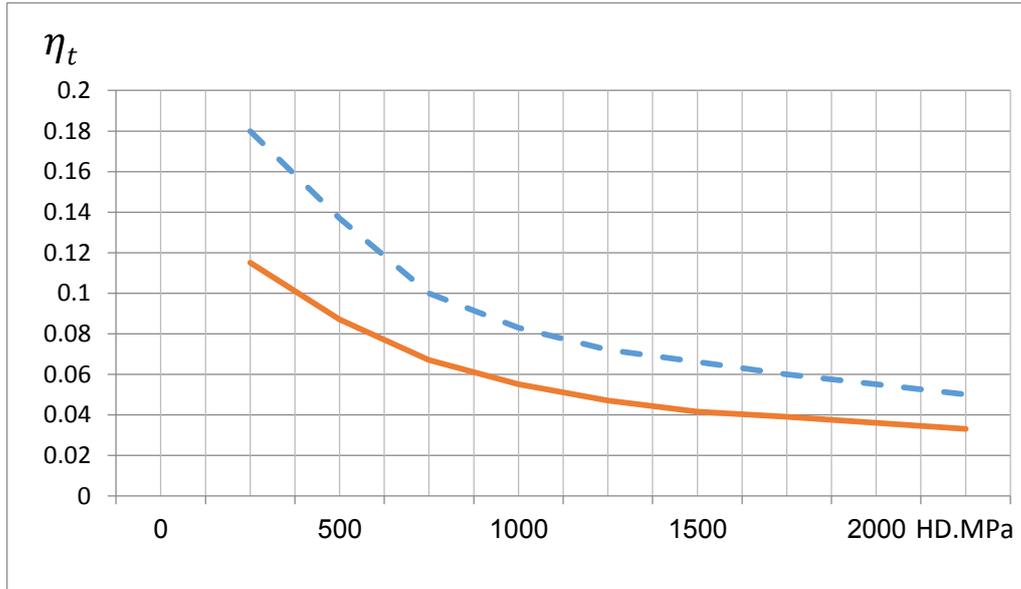
النتائج والمناقشة

إنّ نتائج دراسة تأثير العوامل المختلفة على بارامترات تماس السطوح المقترنة لعناصر الوصلات التداخلية نبينها وفق الاشكال من (1) حتى (5).

عند دراسة وتحليل هذه المنحنيات يتبين الاتي:

بزيادة قساوة اللدونة HD في منطقة التماس تنقلص مساحة التماس الفعلية الشكل (2) نتيجة انخفاض التقارب

α في التماس المشروط بغرز النتوءات

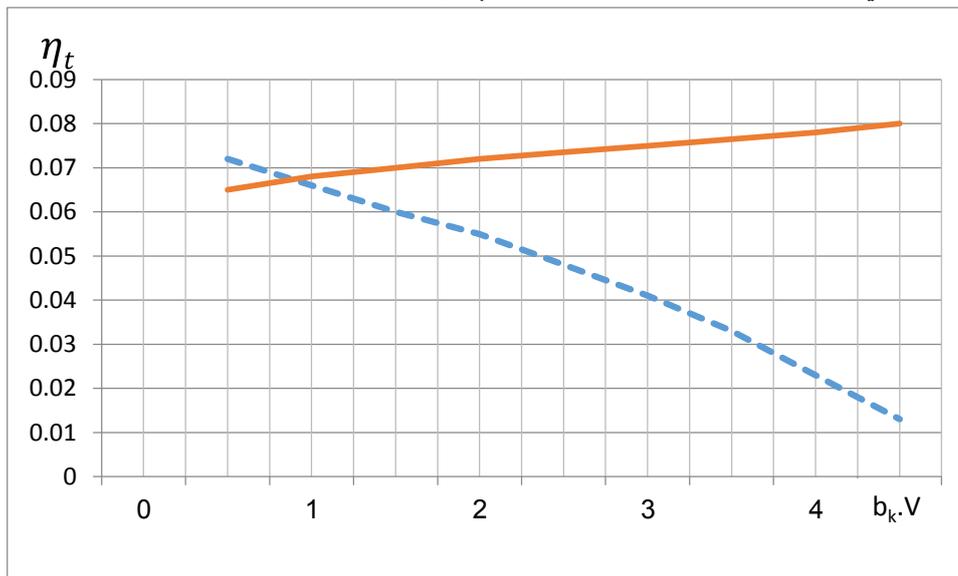


شكل (2). تغير مساحة التماس الفعلية النسبية تبعاً للقساوة اللدنة، (الخط المستمر)

عند عدم التسطح للنتوءات، (الخط المتقطع) عند التسطح للنتوءات.

عند تماس السطوح الاسطوانية، بتكبير الثابت b لمنحني اسناد السطح (زيادة دقة تشغيل السطح) تقود لزيادة مقدار مساحة التماس الفعلية النسبية الشكل (2)، ويمكن تفسير ذلك بأنه بزيادة b ترتفع كثافة التوزيع وهذا يؤدي إلى انخفاض α .

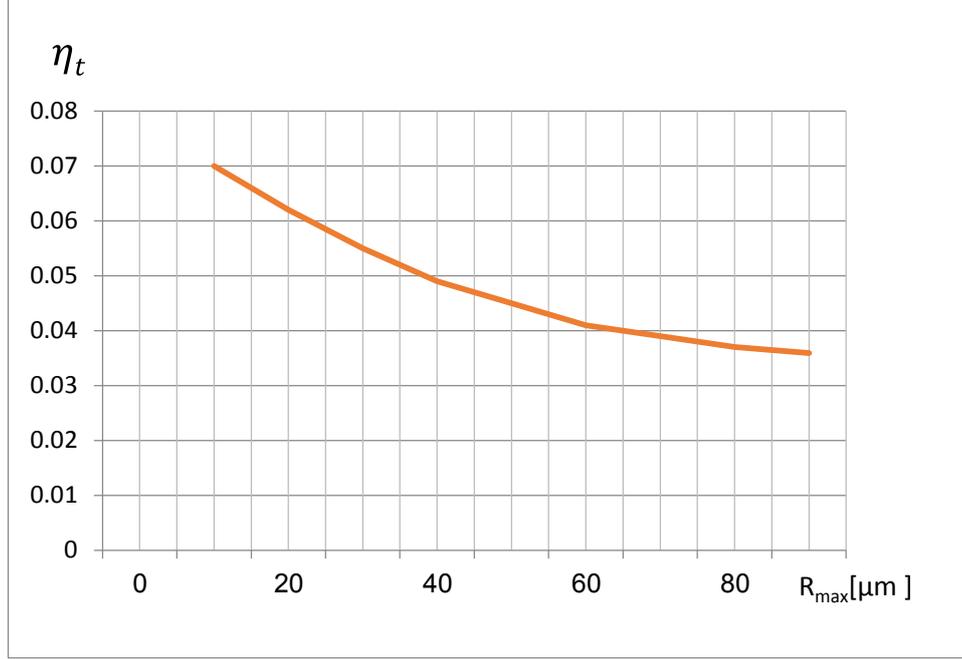
بزيادة الثابت v أي بتخفيض دقة تشغيل السطح، ينخفض مقدار η_r اما α فيزداد شكل (3) وسبب ذلك أنه بانخفاض كثافة توزيع المادة في المناطق الخارجية (في الاطراف) لطبقة الخشونة يزداد الثابت لها وفي هذه الشروط تزداد القوى المؤثرة في النتوءات المتماسة المنفصلة مما يؤدي الى زيادة α .



شكل (3). تغير مساحة التماس الفعلية النسبية تبعاً ل b ، (الخط المستمر)

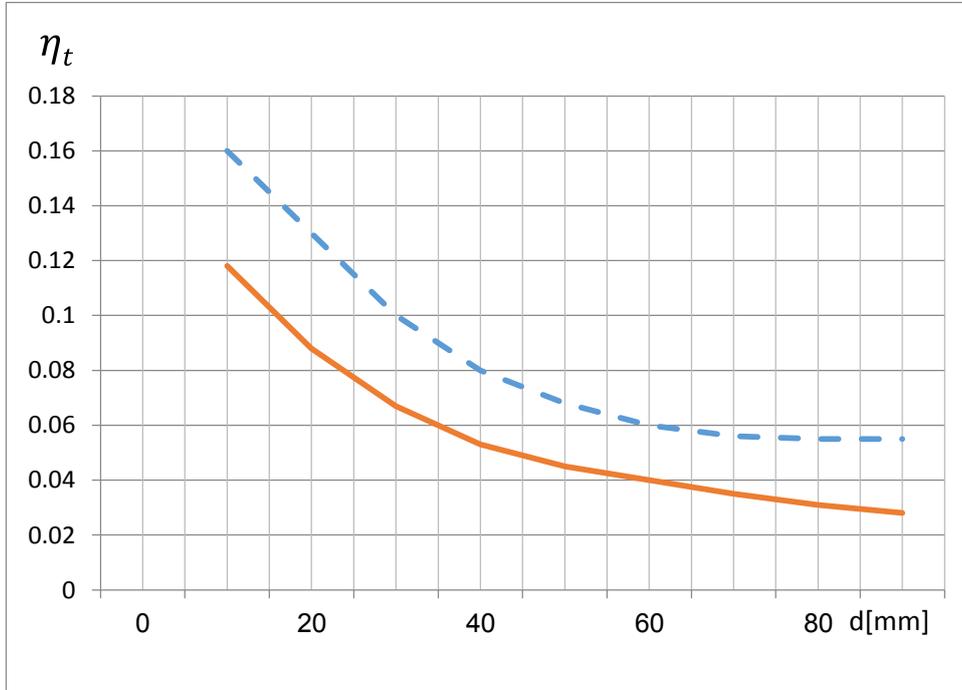
عند عدم التسطح للنتوءات، وتبعاً لـ v (الخط المتقطع) عند التسطح للنتوءات.

بزيادة الارتفاع الاعظمي لعدم استواء البروفيل R_{max} (أي بتخفيض دقة تشغيل السطح) ينخفض مقدار η_r شكل(4)، لأنه بزيادة R_{max} عند ثبات R, v, b تنخفض كثافة توزيع المادة في طبقة الخشونة لذلك تزداد القيمة المطلقة للتقارب α .



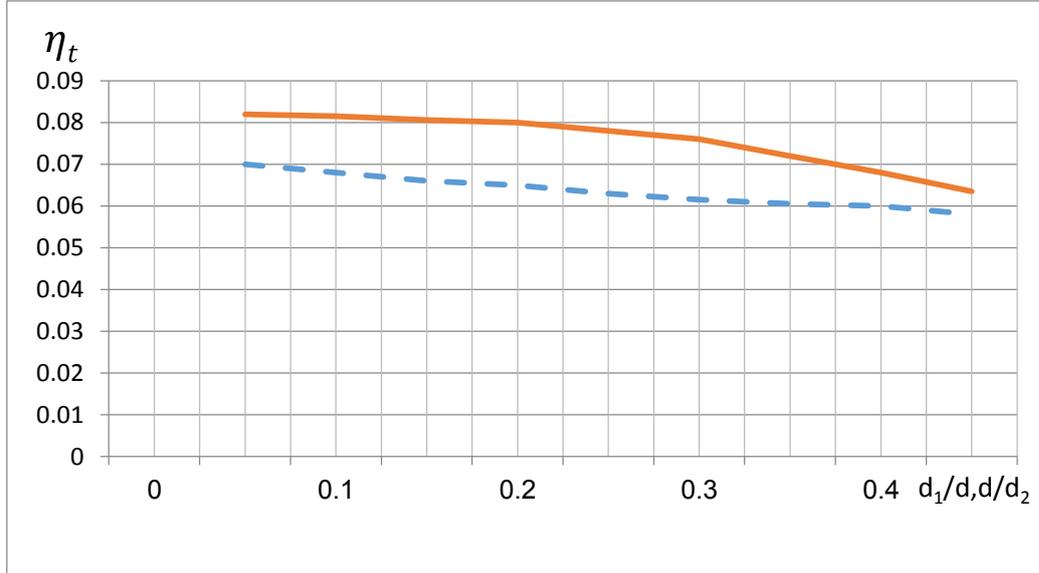
شكل (4). تغير مساحة التماس الفعلية النسبية تبعاً لارتفاع عدم استواء السطح الأعظمي R_{max} .

بزيادة القطر الاسمي d لسطوح الاقتران ينخفض مقدار مساحة التماس الفعلية النسبية η_r بشكل مستمر الشكل (5) والذي يظهر نتيجة للعلاقة المماثلة للضغط بالقطر على السطوح المقترنة لعناصر الوصلات المشكلة بتداخل.



شكل (5). تغير مساحة التماس الفعلية النسبية تبعاً للقطر الاسمي لسطوح الاقتران d (الخط المستمر) عند عدم التسطح للتفاوتات، (الخط المتقطع) عند التسطح للتفاوتات.

زيادة سماكة السطوح النسبية $\frac{d_1}{d}$ للمحور و $\frac{d}{d_2}$ للجلبة ينخفض مقدار η_r ، والذي يظهر نتيجة للعلاقة المماثلة للضغط بسماكة السطوح النسبية للعناصر المقترنة شكل (6).



شكل (6). تغير مساحة التماس الفعلية النسبية تبعاً ل $\frac{d_1}{d}$ (الخط المتقطع)، وتبعاً $\frac{d}{d_2}$ (الخط المستمر).

نشير هنا إلى أن معظم المنحنيات الناتجة هي لحالات نتوءات خشونة سطوح غير مسطحة. من أجل الحالات المسطحة، الميزة النوعية لعلاقة المساحة الفعلية للتماس بالعوامل المختلفة مماثلة للغير مسطحة ولكن القيم العددية لهذه البارامترات يمكن أن تختلف بشكل واضح وهذا ويبين ذلك بالأشكال (1) و (4)، حيث تمت مقارنة نتائج تحديد مساحة التماس الفعلية عند تسطح وعدم تسطح نتوءات خشونة السطح في الوصلات التداخلية. الفرق بين مساحات التماس في كلتا الحالتين تتخفف بزيادة قطر الاقتران d (نتيجة انخفاض الضغط) أو زيادة قساوة اللدونة HD والتي تتوافق بزيادة الجزء المرن للمركبة α_y في التقارب الكلي (العام)، وبالتالي يؤكد التحليل المقدم ضرورة الدراسة المستقبلية لإمكانية تحميل الوصلات المشكلة بالتداخل مع الاخذ بعين الاعتبار تأثير البارامترات الأساسية للوصلات: الأبعاد الهندسية للعناصر، ثابت المرونة وقساوة موادها، بارامترات الخشونة واتجاه آثار التصنيع الميكانيكي على السطوح المقترنة، طبيعة التشوه والنتوءات.

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات

- زيادة قساوة اللدونة HD في منطقة التماس تؤدي إلى انخفاض مساحة التماس الفعلية النسبية.
- زيادة دقة تشغيل السطح، أي زيادة قيمة الثابت b لمنحني اسناد السطح، تقود لزيادة مقدار مساحة التماس الفعلية النسبية.
- تخفيض دقة تشغيل السطح، أي زيادة الثابت v يؤدي الى انخفاض مقدار η_r .
- زيادة الارتفاع الاعظمي لعدم استواء البروفيل R_{max} ، أي بتخفيض دقة تشغيل السطح، ينخفض مقدار η_r .

- ينخفض مقدار مساحة التماس الفعلية النسبية، بزيادة القطر الاسمي d لسطوح الاقتران للعناصر المشكلة للوصلة.

- إن زيادة سماكة السطوح النسبية $\frac{d_1}{d}$ للمحور و $\frac{d}{d_2}$ للجلبة، يؤدي الى انخفاض مقدار مساحة التماس الفعلية النسبية.

التوصيات:

ينصح بمتابعة دراسة إمكانية تحميل الوصلات المشكلة بالتداخل مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير البارامترات الأساسية للوصلات: الأبعاد الهندسية للعناصر، ثوابت المرونة وقساوة موادها، بارامترات الخشونة واتجاه آثار التصنيع الميكانيكي على السطوح المقترنة، طبيعة التشوه والنتوءات.

المراجع

1. **ИВАНОВ, М. Н.** *Детали машин*, 10-е изд., перер.- М.: Высшая школа, 2006-408 с.
2. **ИВАНОВ, А. С.** *Учет контактной жесткости при расчете неподвижных соединений*, Вестник машиностроения. – 2005. – № 3. – С. 46–48.
3. **Дёмкин Н.Б.** *Контактирование шероховатых поверхностей*, М.:Наука, 1970. 227с.
4. **ДРОЗД, М. С.** *Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации*, М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
5. **ДЕМКИН, Н. Б.** *Качество поверхности и контакт деталей машин*, М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
6. **МАТЛИН, М. М.** *Закономерности упругопластического контакта в задачах поверхностного пластического деформирования*, М:Машиностроение, 2007- 218 с.
7. **МАТЛИН, М.М.** *Жесткость упругопластического контакта деталей машин*, М: Машиностроение, 2015. - 217 с.
8. **МАТЛИН, М.М.** *Влияние соотношения твердостей, нагрузки и параметров шероховатости на величину сближения в упругопластическом контакте шероховатых поверхностей плоских деталей*, Трение и износ. – 2016. – Т. 37, №4. – С. 416-420.
9. **МАТЛИН, М.М.** *Оценка влияния соотношения твердостей деталей на контактную жесткость*, Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования : межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. техн. ун-т. - Тверь, 2013. - Вып. 6. - С. 14-18.
10. **МАТЛИН, М.М.** *Определение контактной жесткости стыка деталей близкой твердости*, Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып.10 - Волгоград, 2014. - № 23 (150). - С. 73-75.
11. **МАТЛИН, М.М.** *Применение закономерностей упругопластического контакта твердых тел к решению прикладных задач*, Проблемы машиностроения и автоматизации. - 1991. - №4. - С. 68-80.
12. **ДРОЗД, М.С.** *Расчет фактической площади контакта в соединениях с натягом*, Вестник машиностроения-1984 - №9 - С.28-30.
13. **МАКСАК, В. И.** *Предварительное смещение и жесткость механического контакта*, М. : Наука, 1975. – 60 с.