

dr hab. inż. Stanisław OKOŃSKI, prof. nadzw. PK, dr inż. Ryszard MOSZUMAŃSKI,  
dr inż. Krzysztof ZARĘBSKI  
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Inżynierii Materiałowej  
kontakt: okonski@mech.pk.edu.pl

# Walcowanie i nagniatanie gwintów wewnętrznych

## Część II. Technologia

### *Rolling and burnishing of internal threads*

#### *Part II. The technology*

#### Streszczenie

Przedstawiono główne zagadnienia technologii walcowania i nagniatania gwintów wewnętrznych za pomocą głowic rolkowych własnej konstrukcji (dobór warunków obróbki, wyniki badań doświadczalnych oraz przybliżoną ocenę obciążeń rolek i łożysk ślizgowych głowic).

#### Abstract:

*The key issues of the technology of rolling and burnishing of internal threads with the rolling heads of own design (selection of process parameters, results of the experimental studies and an approximate estimate of load acting on the rolls and sliding bearings in the rolling head) were described.*

**Słowa kluczowe:** walcowanie, nagniatanie, gwinty wewnętrzne, głowice rolkowe, warunki obróbki

**Keywords:** rolling, burnishing, internal threads, rolling heads, process parameters

#### 1. DOBÓR WARUNKÓW OBRÓBK W PROCESACH WALCOWANIA I NAGNIATANIA GWINTÓW WE- WNĘTRZNYCH ZA POMOCĄ GŁO- WIC ROLKOWYCH

**Średnica otworu półwyrobu do walcowania gwintu wewnętrznego.** Średnicę otworu  $D_0$  można wyznaczyć z warunku stałej objętości (objętość materiału wyciśniętego przez wierzchołek zarysu narzędzia jest równa objętości utworzonego wierzchołka gwintu). W literaturze [1–3] można znaleźć cały szereg wzorów do określania średnicy  $D_0$ . Trzeba stwierdzić, że wszystkie one mają charakter przybliżony, gdyż nie uwzględniają płynięcia materiału wzdłuż osi otworu i odkształceń sprężystych układu przedmiot – narzędzie (P – N). Przy korzystaniu z nich należy pamiętać, że wymiary narzędzia nie

#### 1. SELECTION OF PROCESS PARA- METERS FOR ROLLING AND BURNISHING OF INTERNAL THREADS WITH ROLLING HEADS

**Blank hole diameter for rolling of internal threads.** The blank hole diameter  $D_0$  can be determined from the constant volume condition (the volume of material squeezed out by the top of the tool profile equals the volume of material contained in the top of the thread profile being made). Technical literature [1–3] gives a number of formulae used for the determination of diameter  $D_0$ . All of them are, however, of an approximate character only, disregarding the flow of material along the axis of the blank hole and the effect of elastic deformation taking place in the workpiece – tool system (P - N). Using these formulae, one has to remember that

odpowiadają wymiarom nominalnym gwintu (należy podstawiać rzeczywiste wymiary narzędzia). Właściwego doboru średnicy otworu należy dokonać w drodze doświadczalnej, ustalając przy okazji zakresy średnic dających żądane wysokości wierzchołków gwintu (nieraz, aby obniżyć siły i moment obciążający narzędzie, walcuje się gwint o obniżonych wierzchołkach, który, ze względu na wzmocnienie materiału, jest wystarczająco wytrzymały).

**Sfazowania otworów.** W celu łatwego wprowadzenia głowicy do otworu oraz zabezpieczenia pierwszego zwoju gwintu przed oderwaniem, a także uniknięcia wypukłości na powierzchniach czołowych nakrętek, krawędzie otworów winny być odpowiednio sfazowane. Zewnętrzną średnicę fazy otworu (kątem  $45^\circ$ ) wyznacza się ze wzoru:

$$D_f \geq D_0 + P \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

Wg [1] należy przyjmować (dla stali i stopów aluminium):

$$D_f = D_0 + 1,4 P \quad (2)$$

**Minimalna grubość ścianki tulei, w której walcowany jest gwint wewnętrzny.** Aby uniknąć trwałych zmian średnicy zewnętrznej tulei, w której walcowany jest gwint należy przyjmować grubości ścianek większe od wartości granicznych ( $g_{\min}$ ). Wg [1]:

$$g_{\min} = 2 P \quad (3)$$

W [2, 3] przedstawiono wyniki obliczeń, z których wynika, że dla gwintu metrycznego:

$$g_{\min} = 1,59 P \quad (4)$$

Minimalną wartość średnicy zewnętrznej tulei oblicza się ze wzoru:

$$D_{z \min} = D_0 + 2 g_{\min} \quad (5)$$

Ponadto przy ustalaniu minimalnej grubości ścianki należy wziąć pod uwagę sposób mocowania przedmiotu i przeniesienia momentu z wrzeciona obrabiarki na przedmiot obrabiany. Stosowanie zaleceń (3) lub (4) odnosi się tylko do przypadku stosowania odpowiednich uchwytów i zabieraków, które przenoszą moment bez obciążania przedmiotu obrabianego skupionymi siłami promieniowymi. Wystąpienie

*tool dimensions do not match the nominal of the tool must be substituted each time). Therefore, relevant dimensions of the blank hole diameter should be obtained by experiments, determining at the same time the ranges of diameters that will give the required thread top height (sometimes to reduce the force and the tool load torque, threads with reduced top height are rolled; due to the material strengthening effect they are still sufficiently durable).*

**Chamfers in blank holes.** For easy insertion of the rolling head into the blank hole, to secure the first thread start from pulling-off, and also to avoid protrusions on the nut front faces, the edges of the holes must be properly bevelled. The outer diameter of the hole chamfer (angle of  $45^\circ$ ) is determined from the following formula:

$$D_f \geq D_0 + P \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

According to [1], for steel and aluminium alloys, the following equation holds good:

$$D_f = D_0 + 1,4 P \quad (2)$$

**Minimum wall thickness of the sleeve in which the internal thread is rolled.** To avoid a permanent change in the outer diameter of the sleeve in which the thread is rolled, wall thicknesses larger than the limit values ( $g_{\min}$ ) should be adopted. According to [1]:

$$g_{\min} = 2 P \quad (3)$$

In [2, 3], the results of calculations are given, from which it follows that for the metric thread:

$$g_{\min} = 1,59 P \quad (4)$$

The minimum outer diameter of the sleeve is calculated from the following formula:

$$D_{z \min} = D_0 + 2 g_{\min} \quad (5)$$

Additionally, in determination of the minimum wall thickness, mounting of the workpiece and torque transfer from the machine spindle to the workpiece must be taken into account. The recommendations given in (3) or (4) apply only to the case, when appropriate fixtures and drivers are used to transfer torque without loading the workpiece with concentrated radial forces. The occurrence of

takich sił (np. pochodzących od szczęk uchwytów obróbkowych) może wywołać lokalną zmianę średnicy wewnętrznej przedmiotu obrabianego, co ostatecznie daje różną na obwodzie wysokość wierzchołka walcowanego gwintu.

**Posuw wzdłużny głowicy** przyjmuje się równy skokowi gwintu walcowanego lub nagniatanego. Przy sztywnym zamocowaniu głowicy i przedmiotu zaleca się stosowanie posuwu gwintowego. Posuw ręczny lub samoczynny może być również stosowany, jeżeli możliwe jest przesunięcie osiowe przedmiotu obrabianego lub głowicy w odpowiednim uchwycie.

**Prędkość walcowania.** Prędkość walcowania  $v$  jest limitowana trwałością panewek ślizgowych, która zależy od wartości  $Pv_c/(d_c l_c)$ , gdzie  $P$  jest całkowitą siłą obciążającą czop rolki o średnicy  $d_c$  i długości  $l_c$ , natomiast:

$$v_c = v \frac{d_c}{d_{2r}} \quad (6)$$

Ostatecznie mamy warunek:

$$v < \frac{d_{2r} l_c}{P} (pv_c)_{gr} \quad (7)$$

gdzie  $(pv_c)_{gr}$  w MPa m/s jest maksymalną dopuszczalną wartością iloczynu średniego nacisku jednostkowego  $p$  i prędkości obwodowej  $v_c$  na średnicy czopa, zależną od materiału czopa i panewki. Stosowany ośrodek chłodząco-smarujący winien zapewnić właściwe smarowanie łożysk.

**Gniot przy nagniataniu.** Nagniatanie przeprowadza się po uprzednim wykonaniu (za pomocą obróbki wiórowej) gwintu o wymiarach różniących się od finalnych. Gniot bezwzględny (zwany w dalszym ciągu gniotem) zdefiniujemy jako wartość różnicy pomiędzy wymiarem nominalnym głowicy oraz wymiarem przygotowanego wstępnie gwintu mierzona prostopadle do powierzchni (rys. 1), co wyraża wzór (8). Przyjmujemy, że dla skoków 1-3 mm wartości  $g$  przy nagniataniu mogą zawierać się w granicach 0,01-0,12 mm. Przy wartościach większych mamy (umownie) do czynienia z walcowaniem gwintu, którego niepełny zarys

*such forces (e.g. derived from the fixture jaws) can cause local changes in the workpiece inner diameter, which will ultimately give on the perimeter a different height of the top of the rolled thread profile.*

**Tool feed per revolution.** *Feed per revolution should be equal to the pitch of the thread rolled or burnished. With rigid mounting of both the head and the workpiece, it is recommended to use screw feed. Manual or automatic feed is also applicable, if axial displacement of the workpiece or of the head in an appropriate holder is possible.*

**Rolling speed.** *The rolling speed  $v$  is limited by the lifetime of slide shells which, in turn, depends on the value of  $Pv_c/(d_c l_c)$ , where  $P$  is the total force loading the roll pin of diameter  $d_c$  and length  $l_c$ , and where:*

$$v_c = v \frac{d_c}{d_{2r}} \quad (6)$$

*Finally we have the condition:*

$$v < \frac{d_{2r} l_c}{P} (pv_c)_{gr} \quad (7)$$

*where  $(pv_c)_{gr}$  in MPa m/s is the maximum permissible value of the product of an average unit pressure  $p$  and peripheral speed  $v_c$  on the pin diameter, depending on the material of which the pin and the slide shell are made. The applied cooling lubricant should ensure proper lubrication of bearings.*

**Reduction at burnishing.** *The operation of burnishing is carried out on a semi-finished thread, initially made by machining to dimensions different from the final ones. Absolute reduction (further called reduction) is defined as a difference between the nominal dimension of the head and dimension of the pre-machined thread measured perpendicular to the surface (Fig. 1) and given by formula (8). Let us assume that for pitches of 1-3 mm, the values of  $g$  at burnishing are comprised in a range of 0.01-0.12 mm. Hence, for larger values, it will be assumed (by convention) that the thread, the incomplete profile of which is to be rolled,*

został wstępnie wykonany inną metodą. Zarys gwintu przeznaczonego do nagniatania winien spełniać określone warunki. Średnica  $D'$  winna być zmniejszona względem średnicy głowicy  $d$  o wartość:

$$\Delta D = d - D' = \frac{2g}{\sin \alpha} \quad (8)$$

Natomiast średnicę wierzchołków  $D_1'$  należy zwiększyć względem wartości nominalnej  $D_1$ , przy czym:

$$\Delta D_1 = D_1' - D_1 \geq \Delta D_{1 \min} \quad (9)$$

Wartość  $\Delta D_{1 \min}$  wynika z warunku (rys. 1):

$$V \geq V_1 + V_2 \quad (10)$$

(objętość materiału  $V_1 + V_2$  wyciśniętego przez wierzchołek zarysu narzędzia musi się zmieścić w objętości  $V$ ). Objętości  $V$ ,  $V_1$  i  $V_2$  wyrażają się wzorami:

$$V = \frac{1}{2} \pi F (d - 2S) \quad (11)$$

$$V_1 = \frac{1}{2} \pi F_1 (d - 2S_1) \quad (12)$$

$$V_2 = \pi F_2 (d - 2S_2) \quad (13)$$

gdzie  $S$ ,  $S_1$  i  $S_2$  określają położenia środków ciężkości przekrojów  $F$ ,  $F_1$  i  $F_2$ :

$$F = \frac{1}{4} \Delta D_1 (2a_2 + a_d) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{4} \Delta D (2a_1 + a_w) = \\ &= \frac{g}{2 \sin \alpha} (2a_1 + a_w) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{\Delta D}{4} \operatorname{tg} \alpha (d - D_1 - \Delta D - \Delta D_1) = \\ &= \frac{g}{2 \cos \alpha} \left( d - D_1 - \frac{2g}{\sin \alpha} - \Delta D_1 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

przy czym:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2} (a_w + \Delta D \operatorname{tg} \alpha) = \\ &= \frac{1}{2} \left( a_w + \frac{2g}{\cos \alpha} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

was initially made by a method other than cutting. The thread profile for burnishing must meet certain conditions. Diameter  $D'$  must be reduced relative to the head diameter  $d$  by a value calculated from:

$$\Delta D = d - D' = \frac{2g}{\sin \alpha} \quad (8)$$

On the other hand, the diameter of the top of the thread profile  $D_1'$  must be increased relative to the nominal value  $D_1$ , where:

$$\Delta D_1 = D_1' - D_1 \geq \Delta D_{1 \min} \quad (9)$$

The value of  $\Delta D_{1 \min}$  results from the following condition (Fig. 1):

$$V \geq V_1 + V_2 \quad (10)$$

(the volume  $V_1 + V_2$  of material squeezed out by the top of the tool profile must be contained in the volume  $V$ ). Volumes  $V$ ,  $V_1$  and  $V_2$  are expressed by the following formulae:

$$V = \frac{1}{2} \pi F (d - 2S) \quad (11)$$

$$V_1 = \frac{1}{2} \pi F_1 (d - 2S_1) \quad (12)$$

$$V_2 = \pi F_2 (d - 2S_2) \quad (13)$$

where  $S$ ,  $S_1$  and  $S_2$  indicate the position of the centres of gravity of sections  $F$ ,  $F_1$  and  $F_2$ :

$$F = \frac{1}{4} \Delta D_1 (2a_2 + a_d) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{4} \Delta D (2a_1 + a_w) = \\ &= \frac{g}{2 \sin \alpha} (2a_1 + a_w) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{\Delta D}{4} \operatorname{tg} \alpha (d - D_1 - \Delta D - \Delta D_1) = \\ &= \frac{g}{2 \cos \alpha} \left( d - D_1 - \frac{2g}{\sin \alpha} - \Delta D_1 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

where:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2} (a_w + \Delta D \operatorname{tg} \alpha) = \\ &= \frac{1}{2} \left( a_w + \frac{2g}{\cos \alpha} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{oraz: } a_2 = \frac{1}{2}(a_d + \Delta D_1 \operatorname{tg} \alpha) \quad (18)$$

$$S = \frac{d - D_1}{2} - \frac{\Delta D_1(a_d + 4a_2)}{6(a_d + 2a_2)} \quad (19)$$

$$S_1 = \frac{\Delta D(a_w + 4a_1)}{6(a_w + 2a_1)} = \frac{g(a_w + 4a_1)}{3 \sin \alpha (a_w + 2a_1)} \quad (20)$$

$$S_2 = \frac{1}{4}(d - D_1 + \Delta D - \Delta D_1) = \frac{1}{4} \left( d - D_1 + \frac{2g}{\sin \alpha} - \Delta D_1 \right) \quad (21)$$

Wykorzystując powyższe równania i przyjmując znak równości w (10), otrzymujemy:

$$f(g, \Delta D_1) = \Delta D_1 \left[ d_1(2a_2 + a_d) + \frac{\Delta D_1}{3}(4a_2 + a_d) \right] - \frac{2g}{\sin \alpha} \left[ d(2a_1 + a_w) - \frac{2g}{3 \sin \alpha}(4a_1 + a_w) \right] - \frac{2g}{\cos \alpha} \left[ \left( d - \frac{2g}{\sin \alpha} \right)^2 - (D_1 + \Delta D_1)^2 \right] = 0 \quad (22)$$

Ostatecznie z (8) i (22) można określić wartości  $\Delta D$  i  $\Delta D_1$  w funkcji gniotu  $g$ , a tym samym również wymiary  $D'$  i  $D_1'$  zarysu gwintu przed nagniataniem. Średnicę  $D_2'$  wyznacza się z równania:

$$D_2' = d_2 - \frac{2g}{\sin \alpha} \quad (23)$$

Analiza powyższa dotyczy przyjętego wariantu nagniatania całej powierzchni zarysu. Jeżeli przyjmiemy wariant nagniatania tylko powierzchni bocznych (gdy rolka głowicy nie kontaktuje się z materiałem na swojej średnicy zewnętrznej ( $D' \geq d$  na rys. 1), to zmniejszenie średnicy wewnętrznej  $\Delta D_1$  jest mniejsze niż to wynika z (22), gdyż część materiału przemieszcza się do wolnych przestrzeni ponad kolejnymi wierzchołkami rolek głowicy.

Wartość  $\Delta D_1$  można w tym przypadku określić doświadczalnie bez konieczności analizy przebiegu odkształceń. Należy dodać,

$$\text{and: } a_2 = \frac{1}{2}(a_d + \Delta D_1 \operatorname{tg} \alpha) \quad (18)$$

$$S = \frac{d - D_1}{2} - \frac{\Delta D_1(a_d + 4a_2)}{6(a_d + 2a_2)} \quad (19)$$

$$S_1 = \frac{\Delta D(a_w + 4a_1)}{6(a_w + 2a_1)} = \frac{g(a_w + 4a_1)}{3 \sin \alpha (a_w + 2a_1)} \quad (20)$$

$$S_2 = \frac{1}{4}(d - D_1 + \Delta D - \Delta D_1) = \frac{1}{4} \left( d - D_1 + \frac{2g}{\sin \alpha} - \Delta D_1 \right) \quad (21)$$

Using the above equations and assuming the equals sign in (10), we get:

$$f(g, \Delta D_1) = \Delta D_1 \left[ d_1(2a_2 + a_d) + \frac{\Delta D_1}{3}(4a_2 + a_d) \right] - \frac{2g}{\sin \alpha} \left[ d(2a_1 + a_w) - \frac{2g}{3 \sin \alpha}(4a_1 + a_w) \right] - \frac{2g}{\cos \alpha} \left[ \left( d - \frac{2g}{\sin \alpha} \right)^2 - (D_1 + \Delta D_1)^2 \right] = 0 \quad (22)$$

Finally, from (8) and (22), we can determine the values of  $\Delta D$  and  $\Delta D_1$  as a function of reduction rates  $g$ , and hence the dimensions of  $D'$  and  $D_1'$  of the thread profile prior to burnishing. The diameter  $D_2'$  is determined from the following equation:

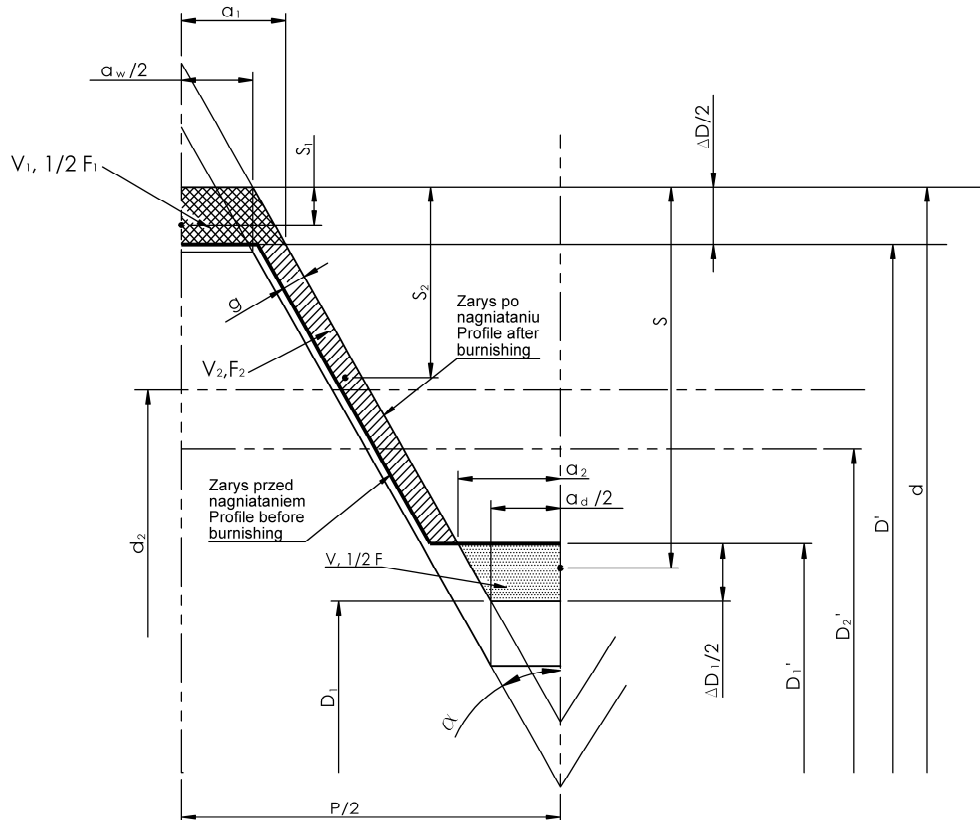
$$D_2' = d_2 - \frac{2g}{\sin \alpha} \quad (23)$$

The above analysis applies only to the approved variant of burnishing the entire profile surface. If we assume a burnishing variant covering the flanks (when the head roll does not contact the material on its outer diameter ( $D' \geq d$  in Figure 1), the reduction in inner diameter  $\Delta D_1$  will be smaller than it would result from (22), since some portions of the material are moving into free spaces above the consecutive crests on the head rolls.

In this case, the value of  $\Delta D_1$  can be determined experimentally without the need of the deformation process analysis. It should be noted that, according to the definition given

że zgodnie z podaną wyżej definicją nie można utożsamiać gniotu z rzeczywistą grubością warstwy odkształconej – ze względu na odkształcenia sprężyste układu P – N.

above, because of the elastic deformation occurring in a workpiece – tool system, the reduction rates should not be identified with the real thickness of the deformed layer.



Rys. 1. Zarysy gwintu wewnętrznego przed i po nagniataniu

Fig. 1. Profiles of internal thread before and after burnishing

## 2. KONSTRUKCJA ROLKI DO NAGNIATANIA LUB WALCOWANIA GWINTU WSTĘPNIE WYKONANEGO OBRÓBKĄ SKRAWANIEM (O ŚREDNICACH MNIJSZYCH OD NOMINALNYCH)

Można stosować rolki, które były zaprojektowane i użyte do walcowania gwintu wprost w otworze półwyrobu lub wykonać rolki specjalne<sup>1</sup>. Średnice wierzchołków pilotujących wyznacza się ze wzoru:

$$d_{w0} = D' - 2c = d - \frac{2g}{\sin \alpha} - 2c \quad (24)$$

## 2. THE DESIGN OF ROLLS FOR BURNISHING OR ROLLING OF SEMI-FINISHED THREADS MADE BY MASHINING (WITH DIAMETERS SMALLER THAN THE NOMINAL VALUE)

One can use rolls that are designed for straight rolling of the thread in a blank hole or make special roll<sup>1</sup>. The diameters of the pilot roll top part are determined from the following formula:

$$d_{w0} = D' - 2c = d - \frac{2g}{\sin \alpha} - 2c \quad (24)$$

<sup>1</sup> Sposoby obliczania wymiarów zarysu rolki opisano w: Okoński S., Moszumański R., Wołowicz M.: Walcowanie i nagniatanie gwintów wewnętrznych. Część I. Konstrukcja narzędzi (artykuł opublikowany w niniejszym numerze); patrz np. rys. 4 oraz wzory (13), (17), (18), w których  $n = 4$ .

<sup>1</sup> The methods to calculate dimensions of the roll profile were described in article: Okoński S., Moszumański R., Wołowicz M.: Rolling and burnishing of internal threads. Part I. The design of tools (published in this issue); see e.g. Figure 4 and formulae (13), (17), (18), where  $n = 4$  has been assumed.

Obliczenia średnic wierzchołków części wejściowych kolejnych rolek proponuje się przeprowadzić w oparciu o zasadę stałych objętości przemieszczonych, względnie równego podziału gniotu na poszczególne wierzchołki:

$$d_{wi} = d - \frac{2g(n-i)}{n \sin \alpha} - 2c \quad (25)$$

gdzie  $i = 1, 2, \dots, n$ . Należy dodać, że operacje nagniatania lub walcowania gwintu wstępnie wykonanego wymagają wprowadzenia głowicy do otworu za pomocą posuwu ręcznego (przed włączeniem posuwu gwintowego równego skokowi gwintu).

### 3. DANE DOŚWIADCZALNE ORAZ PRZYBLIŻONA OCENA OBCIĄŻENIA ROLEK GŁOWICY I ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH

W dalszym ciągu przedstawiono wybrane wyniki badań doświadczalnych procesów walcowania i nagniatania gwintów wewnętrznych w różnych materiałach. Przytoczono dane bezpośrednio przydatne przy projektowaniu narzędzi i technologii<sup>2</sup>.

**Moment walcowania.** Rejestrowano maksymalną wartość momentu walcowania i jego przebieg w funkcji drogi narzędzia<sup>3</sup> dla różnych wartości średnic otworów  $D_0$  (wyniki badań podano na rys. 2 i 3).

**Średnice podziałowe  $D_2$  gwintu walcowanego.** Badano zależności średnic podziałowych  $D_2$  od średnic otworów  $D_0$  (wyniki przedstawiono na rys. 4 i 5)<sup>4</sup>.

**Odkształcenia sprężyste układu P – N.** Wymiary głowicy i gwintu walcowanego lub nagniatanego przedstawiono na schemacie (rys. 6).

*It is proposed to calculate the top diameters of the successive entering part rolls applying the rule of constant displaced volume or a uniform distribution of reduction rates among the individual roll top:*

$$d_{wi} = d - \frac{2g(n-i)}{n \sin \alpha} - 2c \quad (25)$$

*where  $i = 1, 2, \dots, n$ . It should be noted that the operations of rolling or burnishing of the semi-finished threads require introducing the rolling head into the blank hole by manual feed (before turning on the screw feed with the pitch equal to that of the thread).*

### 3. EXPERIMENTAL DATA AND APPROXIMATE ESTIMATE OF LOAD ACTING ON THE HEAD ROLLS AND SLIDE BEARINGS

*Further in the text, some selected experimental results of the processes of rolling and burnishing of threads in a variety of materials are presented. Data directly useful in the design of tools and technologies were quoted<sup>2</sup>.*

**Rolling torque.** *Maximum rolling torque and its route were recorded as a function of the tool displacement<sup>3</sup> for different blank hole diameters  $D_0$  (the results are shown in Figures 2 and 3).*

**Pitch diameters  $D_2$  of the rolled thread.** *Studies included relationships between pitch diameters  $D_2$  and blank hole diameters  $D_0$  (the results are shown in Figures 4 and 5)<sup>4</sup>.*

**Elastic deformation in the workpiece – tool system (P – N).** *The dimensions of the head and rolled or burnished thread are shown in respective diagram (Fig. 6).*

<sup>2</sup> Pozostałe wyniki badań dotyczące także wytrzymałości na ścinanie, twardości i chropowatości powierzchni walcowanych i nagniatanych gwintów można znaleźć w [6].

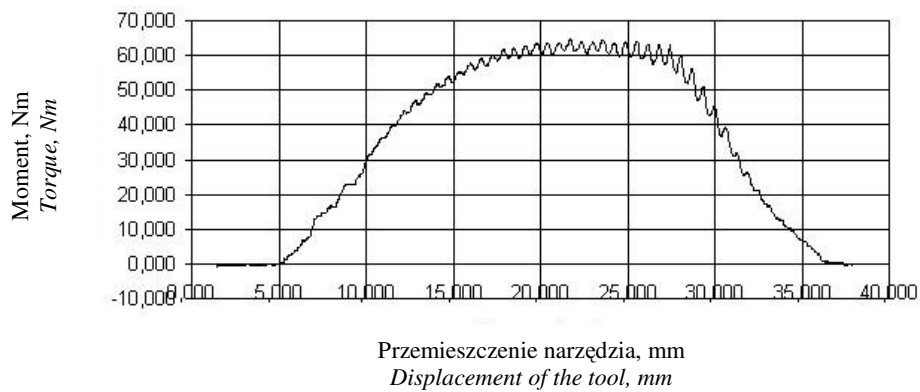
<sup>3</sup> Stosowano czujnik momentu CL22-200 i wzmacniacz pomiarowy CL361 produkcji Zakładu Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych ZEPWN Marki. Walcowanie i nagniatanie przeprowadzono na tokarce TUM25.

<sup>4</sup> Pomiar za pomocą mikrometru do gwintów z wymiennymi końcówkami prod. Ultra Präzision Messzeuge GmbH.

<sup>2</sup> Other results of studies, related also shear strength, hardness and surface roughness of the rolled or burnished thread surfaces are published in [6].

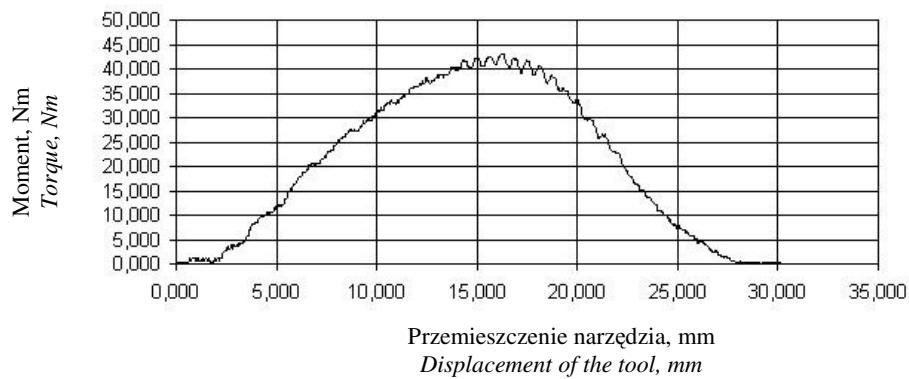
<sup>3</sup> The instruments used included CL22-200 torque sensor and CL361 measurement amplifier, both made by Zakład Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych ZEPWN Marki. The operations of rolling and burnishing were performed on a TUM25 lathe.

<sup>4</sup> Measurements were taken using thread micrometer with replaceable inserts made by Ultra Präzision Messzeuge GmbH.



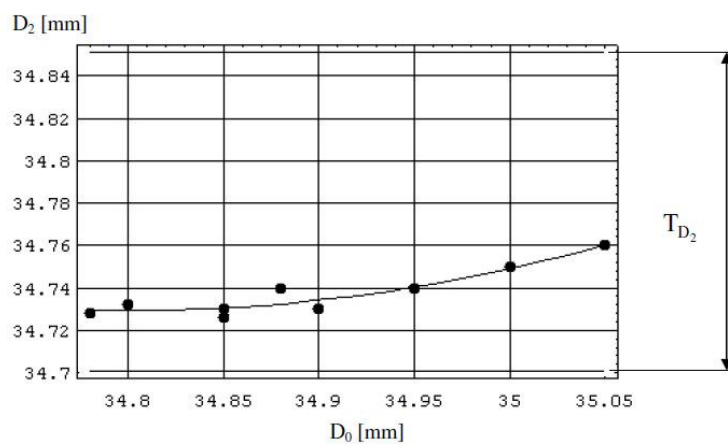
Rys. 2. Moment walcowania w funkcji przemieszczenia narzędzia (materiał: 11SMn30, gwint M36x2x25,  $D_0 = 34,84$  mm,  $D_1 = 33,90$  mm, moment maksymalny: 64,8 Nm)

Fig. 2. Rolling torque as a function of displacement of the tool (material: 11SMn30 steel, thread: M36x2x25,  $D_0 = 34,84$  mm,  $D_1 = 33,90$  mm, maximum torque: 64,8 Nm)



Rys. 3. Moment walcowania w funkcji przemieszczenia narzędzia (materiał: mosiądz MO63, gwint M36x2x20,  $D_0 = 34,80$  mm,  $D_1 = 33,10$  mm, moment maksymalny: 42,9 Nm)

Fig. 3. Rolling torque as a function of displacement of the tool (material: MO63 brass, thread: M36x2x20,  $D_0 = 34,80$  mm,  $D_1 = 33,10$  mm, maximum torque: 42,9 Nm)

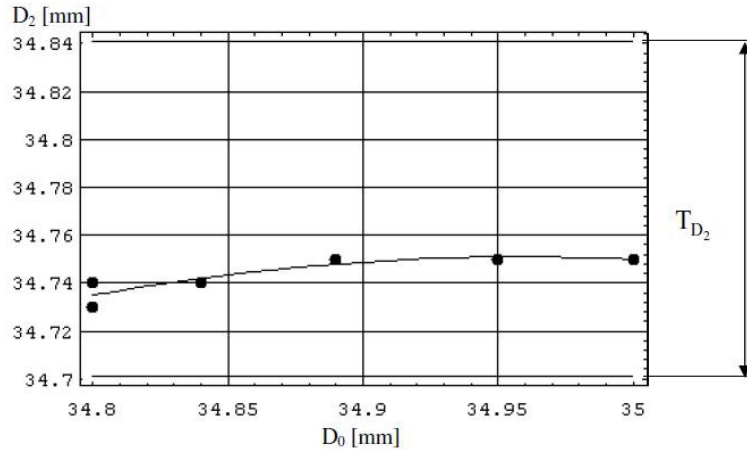


Rys. 4. Zależność średnicy podziałowej  $D_2$  walcowanego gwintu od średnicy otworu  $D_0$  (materiał: dural PA6 przesycany, gwint M36x2; zaznaczono pole tolerancji

$$T_{D_2} = 140 \mu\text{m})$$

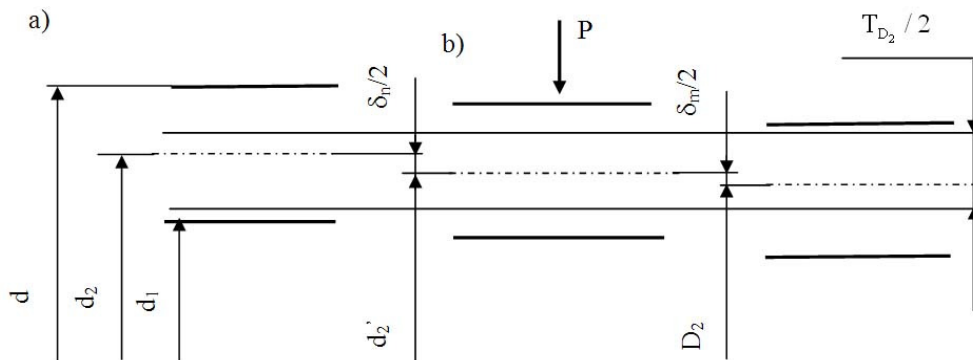
Fig. 4. Rolled thread pitch diameter  $D_2$  vs blank hole diameter  $D_0$  (material: solution heat treated PA6 aluminium alloy, thread: M36x2; marked tolerance field  $T_{D_2} = 140 \mu\text{m}$ )





Rys. 5. Zależność średnicy podziałowej  $D_2$  walcowanego gwintu od średnicy otworu  $D_0$  (materiał: mosiądz MO63, gwint M36x2; zaznaczono pole tolerancji  $T_{D_2} = 140 \mu\text{m}$ )

Fig. 5. Rolled thread pitch diameter  $D_2$  vs blank hole diameter  $D_0$  (material: MO63 brass, thread: M36x2; marked tolerance field  $T_{D_2} = 140 \mu\text{m}$ )



Rys. 6. Wymiary narzędzia i walcowanego gwintu (schemat): a) rzeczywiste średnice  $d$ ,  $d_2$  i  $d_1$  głowicy, b) średnica podziałowa  $d_2'$  głowicy podczas walcowania lub nagniatania, c) średnica podziałowa gwintu  $D_2$  po wyjściu narzędzia;  $\delta_n$  – zmiana średnicy podziałowej głowicy wywołana siłą działającą na rolkę,  $\delta_m$  – zmiana średnicy podziałowej gwintu wywołana powrotem sprężystym,  $T_{D_2}$  – pole tolerancji średnicy podziałowej gwintu

Fig. 6. Tool and rolled thread dimensions (scheme): a) actual diameters  $d$ ,  $d_2$  and  $d_1$  of the rolling head, b) pitch diameter  $d_2'$  of the rolling head during rolling or burnishing, c) pitch diameter  $D_2$  of the thread after tool exit,  $\delta_n$  – change in the rolling head pitch diameter caused by force acting on rolls,  $\delta_m$  – change in the thread pitch diameter caused by elastic recovery,  $T_{D_2}$  – tolerance field for the thread pitch diameter

Zmiana średnicy podziałowej  $\delta_n$  wynika z odkształceń narzędzia (ugięcie rolki, podatność stykowa na granicach panewka – korpus i panewka – czop). Powrót sprężysty jest uzależniony od właściwości materiałów, z których zbudowana jest głowica, rodzaju odkształcanego materiału i wartości sił

The change in pitch diameter  $\delta_n$  is due to the tool deformation (roll deflection, contact flexibility at the shell-body and shell-pin boundaries). The elastic recovery depends on the properties of materials from which the head is constructed, on the type of material deformed, and on the value of forces

obciążających głowicę. Różnica pomiędzy średnicami  $d_2$  i  $D_2$  wynosi:

$$\delta = d_2 - D_2 = \delta_n + \delta_m \quad (26)$$

Dane uzyskane w trakcie badań pozwalają na określenie wartości  $\delta$  dla głowic prototypowych M36x2 przy walcowaniu i M36x3 przy nagniataniu. Jest ona funkcją średnicy otworu  $D_0$  lub gniotu  $g$  (tablice 1 i 2).

loading the head. The difference between the diameters  $d_2$  and  $D_2$  is:

$$\delta = d_2 - D_2 = \delta_n + \delta_m \quad (26)$$

The test data enable determining the value of  $\delta$  for prototype heads to roll M36x2 threads and burnish M36x3 threads. It is a function of the blank hole diameter  $D_0$  or reduction rate  $g$  (Tables 1 and 2).

Tablica 1. Odkształcenia sprężyste układu przedmiot – narzędzie przy walcowaniu gwintu M36x2  
Table 1. Elastic deformation in a workpiece – tool system on rolling of the M36x2 thread

Lp.	Materiał	$D_0$ , mm	$\delta = \delta_n + \delta_m$ , mm
1	Stal 11SMn30	34,84 – 35,00	0,10 – 0,12
2	Dural PA6 przesycany	34,78 – 35,05	0,06 – 0,09
3	Mosiądz MO63	34,80 – 35,00	0,07 – 0,09

Tablica 2. Odkształcenia sprężyste układu przedmiot – narzędzie przy nagniataniu gwintu M36x3  
Table 2. Elastic deformation in a workpiece – tool system on burnishing of the M36x3 thread

Lp.	Materiał	$g$ , mm	$\Delta = \delta_n + \delta_m$ , mm
1	Stal 11SMn30	0,01 – 0,12	0,03 – 0,10
2	Dural PA6 przesycany	0,01 – 0,10	0,03 – 0,09
3	C35 (odkuwki nakrętek)	0,01 – 0,03	0,07 – 0,09

**Obciążenie rolek i łożysk ślizgowych głowicy.** Oceny obciążenia rolek i łożysk ślizgowych głowicy dokonano na podstawie znanych (zmierzonych) wartości  $M$  momentu skręcającego obciążającego głowicę podczas walcowania lub nagniatania. Przybliżony związek pomiędzy siłą normalną  $N$  i styczną  $T$  działającymi na rolkę (rys. 7) można zapisać (jak dla tarcia tocznego) w postaci:

$$N = T \frac{d_r}{2x_A} \quad (27)$$

Dla głowicy z trzema rolkami:

$$T = \frac{M}{3c} \quad (28)$$

Całkowita siła  $P$  obciążająca rolkę wynosi:

$$P = \sqrt{N^2 + T^2} = \frac{M}{3c} \sqrt{1 + \frac{d_r^2}{4x_A^2}} \quad (29)$$

#### Load on head rolls and slide bearings.

The load acting on head rolls and slide bearings was estimated from the known (measured) values  $M$  of torque loading the head during rolling or burnishing. The approximate relationship between normal ( $N$ ) and tangent ( $T$ ) forces acting on the roll (Fig. 7) can be written in the form (as for rolling friction):

$$N = T \frac{d_r}{2x_A} \quad (27)$$

For the head with three rolls:

$$T = \frac{M}{3c} \quad (28)$$

Total force  $P$  loading the roll is:

$$P = \sqrt{N^2 + T^2} = \frac{M}{3c} \sqrt{1 + \frac{d_r^2}{4x_A^2}} \quad (29)$$

gdzie przy walcowaniu:

$$x_A = \frac{1}{2} \sqrt{D_0^2 - \left( \frac{D_0^2 - d_r^2 + 4c^2}{4c} \right)^2} \quad (30)$$

W powyższym wzorze dla nagniatania można przyjąć w miejsce średnicy  $D_0$  wartość  $D_1'$  (rys. 1). Średni nacisk jednostkowy w łożysku ślizgowym  $p$ , naprężenie gnące w rolce  $\sigma_g$  i strzałkę ugięcia  $f$  oblicza się ze wzorów:

$$p = \frac{P}{l_c d_c} \quad \sigma_g = \frac{M_g}{W_g} = \frac{8PL}{\pi d_c^3} \quad (31)$$

$$f = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{4PL^3}{3\pi E d_c^4}$$

Przykładowe wyniki obliczeń wartości  $p$ ,  $\sigma_g$ ,  $f$  oraz iloczynu  $pv_c$  dla walcowania gwintu wewnętrznego w badanych materiałach podano w tablicach 3-5.

where during rolling:

$$x_A = \frac{1}{2} \sqrt{D_0^2 - \left( \frac{D_0^2 - d_r^2 + 4c^2}{4c} \right)^2} \quad (30)$$

When the above formula is applied in the operation of burnishing, the diameter  $D_0$  can be replaced with the value of  $D_1'$  (Fig. 1). The average unit pressure in slide shell  $p$ , the bending stress  $\sigma_g$  and deflection  $f$  in the roll are then calculated from the following equations:

$$p = \frac{P}{l_c d_c} \quad \sigma_g = \frac{M_g}{W_g} = \frac{8PL}{\pi d_c^3} \quad (31)$$

$$f = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{4PL^3}{3\pi E d_c^4}$$

Examples of the calculated values of  $p$ ,  $\sigma_g$ ,  $f$ , and of the product  $pv_c$  for rolling of internal threads in the examined materials are given in Tables 3 – 5.

Tablica 3. Iloczyn  $pv_c$ , naprężenia gnące  $\sigma_g$  i strzałka ugięcia rolki  $f$  podczas walcowania gwintu M36x2; materiał: mosiądz MO63

Table 3. Product  $pv_c$ , bending stress  $\sigma_g$  and deflection  $f$  of the roll during rolling of M36x2 thread; material: MO63 brass

Lp.	$D_0$ , mm	$M_{max}$ , Nm	$P$ , kN	$p$ , MPa	$pv_c$ , MPa m/s	$\sigma_g$ , MPa	$f$ , mm
1	35,00	34,0	2,11	11,7	0,815	220	0,017
2	34,95	35,9	2,20	12,2	0,849	229	0,018
3	34,80	43,3	2,56	14,2	0,988	267	0,021

$d_r = 13,27$  mm,  $d_2 = 34,84$  mm,  $c = 11,51$  mm,  $v = 0,091$  m/s,  $v_c = 0,070$  m/s,  $L = 29,9$  mm,  $d_c = 9,00$  mm,  $l_c = 10,00$  mm

Tablica 4. Iloczyn  $pv_c$ , naprężenia gnące  $\sigma_g$  i strzałka ugięcia rolki  $f$  podczas walcowania gwintu M36x2; materiał: 11SMn30

Table 4. Product  $pv_c$ , bending stress  $\sigma_g$  and deflection  $f$  of the roll during rolling of M36x2 thread; material: 11SMn30 steel

Lp.	$D_0$ , mm	$M_{max}$ , Nm	$P$ , kN	$P$ , MPa	$pv_c$ , MPa m/s	$\sigma_g$ , MPa	$f$ , mm
1	35,00	51,4	3,19	17,7	1,23	333	0,026
2	34,95	53,9	3,30	18,3	1,27	345	0,027
3	34,89	59,0	3,56	19,8	1,37	372	0,029
4	34,85	71,1	4,25	23,6	1,64	444	0,035
5	34,80	76,2	4,50	25,0	1,74	470	0,037

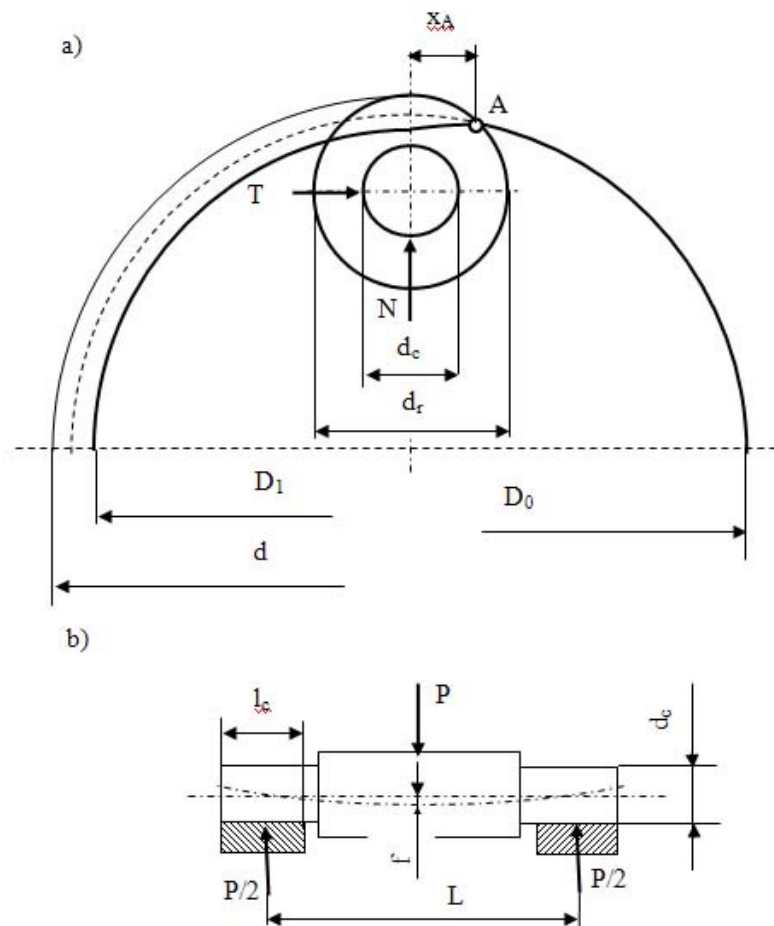
$d_r = 13,27$  mm,  $d_2 = 34,84$  mm,  $c = 11,51$  mm,  $v = 0,091$  m/s,  $v_c = 0,070$  m/s,  $L = 29,9$  mm,  $d_c = 9,00$  mm,  $l_c = 10,00$  mm

Tablica 5. Iloczyn  $pv_c$ , naprężenia gnące  $\sigma_g$  i strzałka ugięcia rolki  $f$  podczas walcowania gwintu M36x2; materiał: dural PA6 przesycany

Table 5. Product  $pv_c$ , bending stress  $\sigma_g$  and deflection  $f$  of the roll during rolling of M36x2 thread; material: PA6 aluminium alloy solution heat treated

Lp.	$D_0$ , mm	$M_{max}$ , Nm	$P$ , kN	$p$ , MPa	$pv_c$ , MPa m/s	$\sigma_g$ , [MPa]	$f$ , mm
1	34,95	30,9	1,89	10,5	0,731	198	0,016
2	34,90	37,6	2,27	12,6	0,878	237	0,019
3	34,85	41,3	2,47	13,7	0,953	258	0,020
4	34,80	43,9	2,59	14,4	1,00	271	0,021
5	34,78	45,0	2,65	14,7	1,02	276	0,022

$d_r = 13,27$  mm,  $d_2 = 34,84$  mm,  $c = 11,51$  mm,  $v = 0,091$  m/s,  $v_c = 0,070$  m/s,  $L = 29,9$  mm,  $d_c = 9,00$  mm,  $l_c = 10,00$  mm



Rys. 7. Schemat obciążenia rolki (a, b) i łożysk głowicy (b)

Fig. 7. Scheme of load acting on the head rolls (a, b) and bearings (b)

Zmiana średnicy podziałowej wywołana ugięciem rolki (ok.  $2f$ ) stanowi część wartości  $\delta_n$ .

Change in the pitch diameter caused by roll deflection (about  $2f$ ) is part of the  $\delta_n$  value.

#### 4. POSUMOWANIE

Skonstruowane i wykonane prototypowe głowice umożliwiają walcowanie i nagniatanie gwintów drobnozwojowych o wysokiej jakości począwszy od średnic nominalnych 24 mm w stalach niskowęglowych oraz stopach miedzi i aluminium. Narzędzia te są silnie obciążone i w związku z tym wymagają starannego wykonania w zakresie dokładności wymiarowo-kształtowej i obróbki cieplnej poszczególnych elementów. Rolki, przy obróbce materiałów o małej wytrzymałości, są trwałe.

Biorąc pod uwagę wartości średnich nacisków  $p$  i iloczynów  $pvc$  (tablice 3 – 5), można stwierdzić, że mogą być stosowane łożyska z kompozytów brązu [8].

Przy projektowaniu wymiarów głowic należy uwzględnić odkształcenia sprężyste układu P – N.

*Badania finansowane ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Program Wieloletni pn. Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008 [7]).*

#### 4. SUMMARY

*The designed and constructed prototype heads enabled making high quality fine-pitch threads starting with nominal diameters of 24 mm, rolled and burnished in low carbon steels and copper and aluminium alloys. These tools are heavily loaded and therefore require high-quality workmanship as regards the precision of shape and dimensional accuracy, as well as carefully selected heat treatment regime applied to individual items. Rolls are stable when low-strength materials are processed, but the key issue is life of the slide bearings.*

*Considering mean values of the pressure  $p$  and products  $pvc$  (Tables 3-5) it can be stated that bearings made of bronze composite [8] seem to be the best solution in this case.*

*When designing the dimensions of the heads, the elastic deformation in a workpiece – tool system should be allowed for.*

*The research work are funded by the Ministry of Science and Higher Education (Long-Term Programme: “Improving innovation development systems in production and operation in the period of 2004-2008” [7]).*

#### LITERATURA / REFERENCES

- [1] Łyczko K.: Technologia narzędzi i wygniatania gwintów wewnętrznych. Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1999.
- [2] Рыжов Е. В., Андрейчиков О. С., Стешков А. Е.: Раскатывание внутренних резб. Изд. Машиностроение, Москва 1974.
- [3] Żurawski Z., Sikora J., Płużek J.: Walcowanie gwintów. WNT, Warszawa 1962.
- [4] Okoński S.: Badania procesu plastycznego kształtowania gwintów wewnętrznych. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1977.
- [5] Okoński S.: Walcowanie gwintów wewnętrznych. Obróbka Plastyczna, t. XVIII, z. 4, 1979.
- [6] S. Okoński, R. Moszumański, A. Tabor: Jakość gwintów wewnętrznych walcowanych i nagniatanych głowicami rolkowymi. Problemy Eksploatacji 4/2010 (79), ITE Radom.
- [7] Projekt Badawczy Zamawiany: PW-004/ITE/08/2006, zadanie 1.1.: Technologie walcowania i nagniatania gwintów wewnętrznych oraz konstrukcje głowic rolkowych do ich realizacji. (S. Okoński, R. Moszumański i inni), Politechnika Krakowska, Kraków 2007 – 2008.
- [8] www.ggbearings.com. Kompozyty brązu. Materiały firmy Glacier Garlock Bearings GMBH & CO. KG.

