

Aleksander Nieoczym ¹⁾, Leszek Gardyński ²⁾

BILANS ENERGETYCZNY PRACY GŁOWICY WKRĘCAJĄCEJ

Streszczenie: Wartość momentu dokręcającego łącznika gwintowego nie jest stała, zależy od dwóch głównych zmiennych: kąta dokręcania oraz sztywności kątowej. Dodatkowo analiza pracy głowicy wkręcającej wykazała, że zapotrzebowanie na energię kinetyczną niezbędną do utrwalenia połączenia jest krótkotrwałe i występuje w końcowej fazie dokręcania. W artykule przeprowadzono analizę matematyczną jednostopniowego procesu wkręcania. Cały proces podzielono na przedziały scharakteryzowane przez zmiany momentu użytecznego oraz prędkości kątowej końcówki wkręcającej.

Słowa kluczowe: impuls wkręcający, kąt dokręcania, moment dokręcający, sztywność kątowa.

ENERGETYCZNE ASPEKTY PRACY GŁOWICY WKRĘCAJĄCEJ

Urządzenia przeznaczone do mechanizacji (automatyzacji) procesu wkręcania łączników gwintowych umożliwiają otrzymanie określonego – w granicach tolerancji – momentu dokręcającego. Wartość tego momentu zależy od własności mechanicznych łącznika gwintowego, a w szczególności od wartości kąta dokręcenia φ_d i sztywności kątowej K (rys.1). Moment dokręcający uzależniony jest także od wartości momentu oporowego powstającego w układzie napędowym i roboczym głowicy wkręcającej. Analiza procesu łączenia elementów gwintowych wykazała, że zapotrzebowanie na energię kinetyczną zamienianą na pracę dokręcania jest krótkotrwałe a maksimum energii kinetycznej koniecznej do połączenia występuje tylko w fazie dokręcania (utrwalania połączenia gwintowego). Automatyczna realizacja cykli połączenia gwintowego wymaga aby prędkość kątowa żadnego z ogniw układu roboczego i napędowego w końcu fazy dokręcania nie zmniejszyła się do wartości równej zero. Układy te mogą przekazać jedynie ograniczoną porcję energii kinetycznej koniecznej do utrwalenia połączenia gwintowego. W celu zachowania ciągłości pracy głowicy, po wykonaniu pracy zewnętrznej, cały układ powinien zakumulować energię i osiągnąć prędkość kątową równą prędkości przed następnym cyklem połączenia. Spełnienie tych założeń wymaga kompleksowej analizy zależności funkcjonalnych układu napędowego i roboczego, co w rezultacie pozwala na właściwy dobór silnika napędowego, przekładni zębatej oraz wirujących mas układu roboczego.

Równanie ogólne bilansu momentów przyjmuje postać:

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej.

$$M_{op} + M_{opw} + I\varepsilon = M_{el} \quad (1)$$

gdzie:

M_{op} – suma momentów oporowych w układzie napędowym i roboczym,

M_{opw} – moment oporów wkręcania łącznika gwintowego,

I – masowy moment bezwładności elementów układu roboczego i napędowego; w fazach: wstępnego wkręcania i swobodnego wkręcania oraz dokręcania moment ten jest przenoszony na końcówkę wkręcającą i przybiera wartość I_z ; w fazie akumulacji energii ulega redukcji na oś silnika napędowego i otrzymuje wartość I_{SR} ,

M_{el} – moment elektryczny silnika napędowego,

ε - przyspieszenie kątowe końcówki wkręcającej.

W zależności od fazy pracy urządzenia, moment M_{opw} przyjmuje wartości :

a) w fazie swobodnego wkręcania $M_{opw} = M_{sw}$, w związku z czym moment M_{sw} ma wartość stałą [1] określoną za pomocą wzoru:

$$M_{sw} = 0,005M_d \quad (2a)$$

b) w fazie dokręcania przyjmuje postać $M_{opw} = M_d$:

$$M_d = M_{sw} + \alpha\varphi$$

$$\alpha = \arctg \frac{M_d - M_{sw}}{\varphi_d - \varphi_{sw}} \quad (2b)$$

gdzie:

M_d - moment dokręcający,

M_{sw} – moment swobodnego wkręcania,

φ_{sw} – kąt obrotu końcówki wkręcającej w końcu fazy swobodnego wkręcania,

φ_d – kąt obrotu końcówki wkręcającej w końcu fazy dokręcania,

α - kąt pochylenia charakterystyki elektrycznego silnika napędowego opisany we współrzędnych $M=f(\varphi)$.

Wkręcanie może odbywać się dwiema metodami [3]:

a) podczas jednego impulsu dokręcany jest z żadaną wartością momentu łącznik gwintowy o średnicy gwintu MA mniejszej od średnicy maksymalnej MY z szeregu łączników przeznaczonych do wkręcania daną głowicą. Łączniki gwintowe o rozmiarze gwintu większym od MA są wkręcane z zadaną wartością momentu podczas n impulsów wkręcających.

b) 2- Podczas jednego impulsu dokręcany jest łącznik gwintowy o średnicy maksymalnej gwintu MY .

Model matematyczny procesu wkręcania łączników gwintowych tworzą równania, z których należy obliczyć:

- prędkość końcową procesu dokręcania ω_k ,
- moment wkręcania M ,
- kąt dokręcania φ ,

- liczbę impulsów wkręcających p , z których $n \in \{1,2,3..p-1\}$ nazwiemy impulsami wkręcającymi, p -ty zaś impulsem dokręcającym.

Impulsy wkręcające powodują wkręcanie łącznika gwintowego z momentami M_n o rosnących wartościach, lecz mniejszych odżądanego momentu dokręcającego M_d ($M_n < M_d$). Rozwinięcie pełnego momentu dokręcającego M_d otrzymujemy podczas impulsu dokręcającego.

SZTYWNOŚĆ KĄTOWA

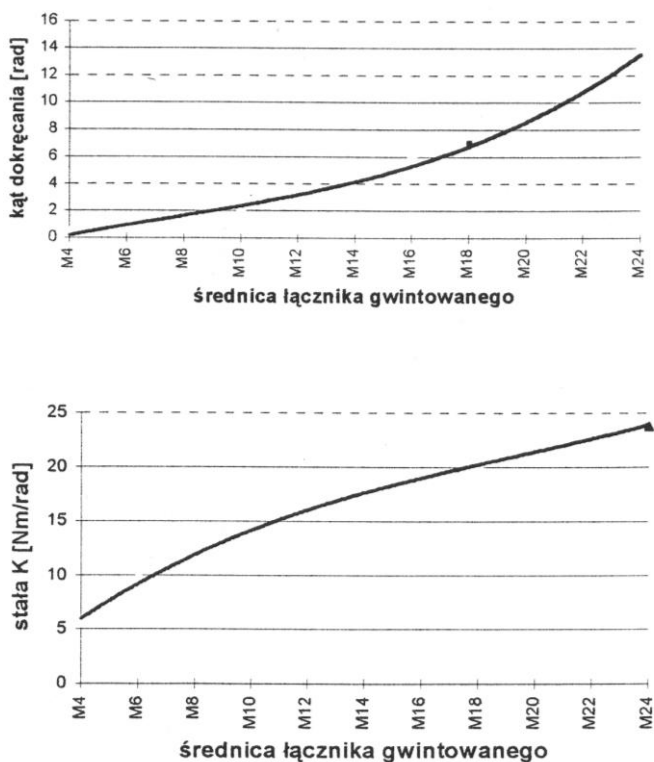
Moment dokręcający można zapisać jako funkcję kąta dokręcenia łącznika gwintowego φ_d i jego sztywność kątową K :

$$M_d = K\varphi_d \quad (3)$$

gdzie:

φ_d – kąt dokręcenia łącznika gwintowego,

K – sztywność kątowa; stała wyznaczona dla konkretnego łącznika gwintowego.



Rys. 1. Zależność wartości kąta dokręcania φ_d i sztywności kątowej K od średnicy łącznika gwintowego

Fig. 1. Influence of the angle of tightening up φ_d and angle rigidity from diameter screw joint

Podstawową przyczyną niedokładności i niestabilności momentu obrotowego podczas dokręcania są wahania sztywności kątowej łącznika gwintowego wynikające ze zmiany współczynnika tarcia na gwincie i powierzchni oporowej śruby oraz niedokładnością wykonania części przeznaczonych do montażu. Powoduje to, że dokładność utrzymania zadanej siły Q przy kontroli pośredniej momentu M_d wynosi $\pm 20\%$. Sztywność kątowa jest więc składową podatności łącznika gwintowego i współczynnika tarcia na linii śrubowej i pod łbem śruby.

W łącznikach gwintowych określonego typu, posiadających jednakowe rozmiary geometryczne, sumaryczna podatność zmienia się nieznacznie. Zmiany te wynikają z różnych wartości współczynnika tarcia na gwincie i powierzchni oporowej. Wychodząc z zależności pomiędzy momentem dokręcającym i kątem dokręcania można zapisać:

$$Q = \frac{K \sum_{i=1}^n \varphi_i}{\pi d_s} \quad (4)$$

gdzie:

φ_i – kąt obrotu śruby podczas i – tego cyklu dokręcania ,
 d_s – średnia średnica współpracy powierzchni gwintowych.

Przy czym sztywność kątowa zawiera się w przedziale:

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \quad (5)$$

Rozrzut siły zakręcania określany jest wzorem:

$$\Delta Q = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{\pi d_s} \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max} K_{\min}} \quad (6)$$

KĄT DOKRĘCANIA ORAZ PRĘDKOŚĆ DOKRĘCANIA

Problem zwiększenia wydajności procesów montażowych rozwiązywany jest poprzez skrócenie czasu operacji montażowych. W przypadku procesu wkręcania łączników gwintowych ulega skróceniu czas t_{sw} swobodnego wkręcania oraz t_d dokręcania. Zmiany te powodują jednoczesne zwiększenie prędkości kątowej urządzenia roboczego. Analizując fazę dokręcania należy zwrócić uwagę nie tylko na zjawiska zachodzące w łączniku gwintowym i jego otoczeniu ale także na proces hamowania elementów wykonawczych urządzenia wkręcającego. W warunkach rzeczywistych proces hamowania zachodzi w czasie określonym przez masowy moment bezwładności I_Z elementów urządzenia [1, 2]:

$$I_Z = f(\omega_k) = \left[\frac{K(\varphi_d + \gamma)}{(\omega_1 - \frac{0.005 M_d \omega_{zS}}{M_{zS} i_p^2})^2 - \omega_k^2} \right] \quad (7)$$

gdzie:

ω_k – prędkość końcowa procesu wkręcania ,

I_Z – masowy moment bezwładności elementów układu napędowego i roboczego zredukowany na końcówkę wkręcającą,

γ - kąt wysprzęglenia sprzęgła przeciążeniowego urządzenia wkręcającego,

ω_1 – prędkość biegu luzem silnika napędowego,

ω_{ZS} – prędkość znamionowa silnika napędowego,

M_{ZS} – moment znamionowy silnika napędowego,

I_p – przełożenie przekładni zębatej w urządzeniu wkręcającym,

M_d – moment dokręcający.

Wpływ masowego momentu bezwładności elementów układu napędowego i roboczego zredukowany na końcówkę wkręcającą urządzenia powoduje zakłócenie kąta dokręcania proporcjonalne do kąta hamowania α_T . W większości przypadków właściwości dynamiczne systemów napędowych urządzeń wkręcających można opisać wyrażeniem [4]:

$$\alpha_T = \int_0^{\infty} \omega_{sw} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \omega_{sw} \tau \quad (8)$$

gdzie:

τ - stała czasowa napędowego silnika elektrycznego

ω_{sw} – prędkość kątowna swobodnego wkręcania.

Zwiększenie dokładności dokręcania można uzyskać przyjmując nowy kąt dokręcania φ_d równy:

$$\varphi'_d = \varphi_d + \alpha_T \quad (9)$$

Przyjmując kąt dokręcania φ'_d uzyskuje się zmianę kąta hamowania $\Delta\alpha_T$ proporcjonalną do wartości $\delta(t)$ błędu stabilizacji prędkości ω_{sw} elementów wykonawczych:

$$\Delta\alpha_T = \delta \omega_{sw} \tau M \quad (10)$$

gdzie: M – krotność stałej czasowej τ .

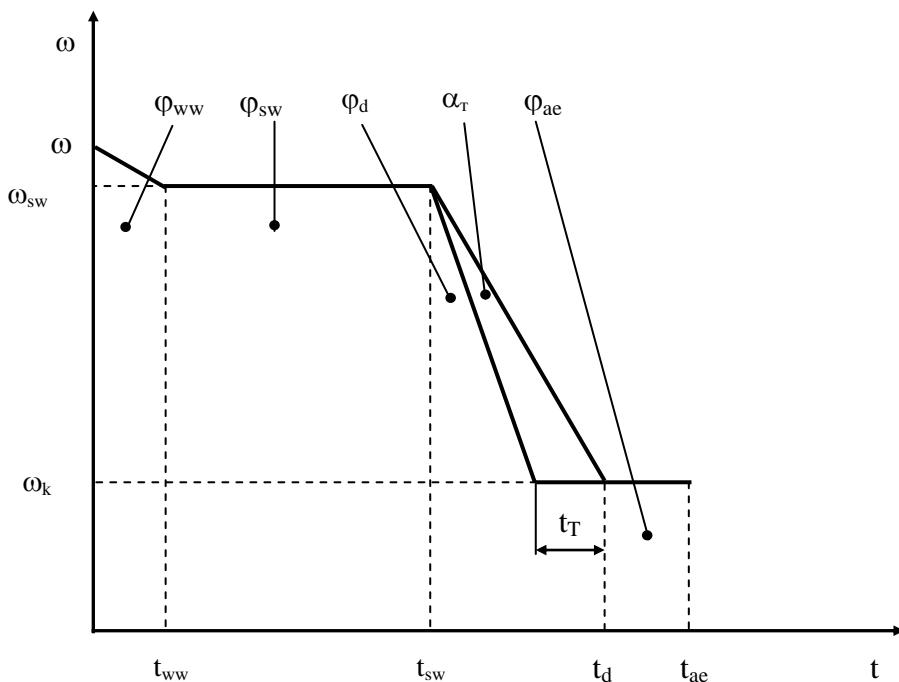
Z wyrażenia (8) wynika, że dopuszczalna prędkość urządzenia $\omega_{sw \max}$, przy której osiąga się niezbędną dokładność dokręcania może być wyrażona wzorem:

$$\omega_{sw \max} = \frac{\Delta\alpha_{T \max}}{\delta \tau M} \quad (11)$$

gdzie: $\Delta\alpha_{T \max}$ – maksymalny dopuszczalny błąd kąta hamowania.

Jeżeli przyjąć jednostopniowy cykl pracy (rys. 2), wówczas czas swobodnego wkręcania i dokręcania określamy:

$$t = \frac{\varphi_{sw}}{\omega_{sw \max} (1 + \delta)} + \frac{\varphi_d + \omega_{sw \max} \tau (1 + \delta)}{\omega_{sw \max} (1 + \delta)} + \tau M \quad (12)$$



Rys. 2. Jednostopniowy przebieg cyklu procesu wkręcania: ω - prędkość kątowna procesu wkręcania łącznika gwintowego, φ - kąt obrotu łącznika gwintowego, t - czas procesu wkręcania, t_{ww} - czas wstępnego wkręcania, t_{sw} - czas swobodnego wkręcania, t_d - czas dokręcania, t_T - czas hamowania, t_{ae} - czas akumulacji energii, ω_l - prędkość kątowna biegu luzem, ω_{sw} - prędkość kątowna początku procesu wkręcania, ω_k - prędkość kątowna końca procesu wkręcania, φ_{ww} - kąt obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy wstępnego wkręcania, φ_{sw} - kąt obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy swobodnego wkręcania, φ_d - kąt obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy dokręcania, φ_{ae} - kąt obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy akumulacji energii, α_T - kąt hamowania.

Fig. 2. Screwing-in process by a method of single impuls: ω - angular velocity of screwing-in, φ - angular displacement of threaded fastener, t - time of screw-in process, t_{ww} - time of initial screwing-in, t_{sw} - time of free screwing-in, t_d - time of power tightening, t_T - time of brake, t_{ae} - time of storage energy, ω_l - angular velocity of idle runnig, ω_{sw} - angular velocity of screwing-in process begining, ω_k - angular velocity of screwing-in process end, φ_{ww} - angular displacement of threaded fastener at phase end of initial screwing-in, φ_{sw} - angular displacement of threaded fastener at phase end of free screwing-in, φ_d - angular displacement of threaded fastener at phase end of power tightening, φ_{ae} - angular displacement of threaded fastener at phase end of storage energy, α_T - angular of brake

Czas fazy wstępnego wkręcania za względu na bardzo małą wartość w porównaniu z czasem trwania kolejnych faz pracy urządzenia może być pominięty. Ponieważ prędkość elementów wykonawczych stabilizuje się z pewnym błędem δ

kąty obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy dokręcania φ_d i akumulacji energii φ_{ae} oblicza się z równania stabilizacji prędkości [4] w pierwszym cyklu dokręcania.

Przy takim założeniu przyjmujemy, że przy prędkości dokręcania ω_{sw} kąt $\varphi_{d2}=0$, wtedy:

$$\varphi_{d1}(\delta) = \varphi_d - \varphi_{ae1}(\delta) - \varphi_{ae2} \quad (13)$$

$$\varphi_{ae2} = \omega_{sw} \tau M \quad (14)$$

$$\varphi_{ae1}(\delta) = (1 + \delta)[(\omega_{sw} - \omega_{k1})\tau + \tau\omega_{sw} M] \quad (15)$$

Przyjmując niekorzystny przypadek, kiedy stabilizacja prędkości kątowej zachodzi w ostatnim cyklu dokręcania, możemy zapisać wyrażenie dla określenia przyrostu kąta akumulacji energii $\Delta\varphi_{ae}$:

$$\Delta\varphi_{ae1} = 2\delta[(\omega_{sw} - \omega_{k1})\tau + \omega_{sw} \tau M] \quad (16)$$

Wtedy czas zakręcania i dokręcania zapisujemy:

$$t = \frac{\varphi_{sw} + \varphi_d}{\omega_{sw}(1 - \delta)} - \frac{1 + \delta}{1 - \delta} \tau + \frac{\tau\omega_k[(1 + \delta)(M - 1) - M]}{\omega_{sw}(1 - \delta)} + \frac{2\delta\tau\omega_{sw}}{\omega_1(1 - \delta)} + \frac{2\delta\tau(M - 1)}{1 - \delta} + 2\tau M \quad (17)$$

Wyrażenie (17) dla określonego rodzaju łączników gwintowych i typu silnika elektrycznego jest funkcja dwóch zmiennych: ω_{sw} i ω_k . W celu określenia punktu możliwego ekstremum należy wybrać z technologicznych ograniczeń maksymalną prędkość ω_{k1} wyłączenia elementu wykonawczego. Wtedy optymalna prędkość zakręcania wynosi:

$$\omega_{sw\ opt} = \sqrt{\frac{(\varphi_{sw} + \varphi_{d1} + \varphi_{d2} + \varphi_{ae1})\omega_{k1} + [(1 + \delta)(M - 1) - M]\tau\omega_{k1}^2}{2\delta\tau}} \quad (18)$$

Otrzymane wartości optymalnej prędkości początku procesu wkręcania (18) oraz maksymalna prędkość wyłączenia ω_{k1} , mogą w dalszej kolejności służyć do obliczenia wydajności urządzenia wkręcającego przy zachowaniu warunków niezbędnej dokładności dokręcania.

PIŚMIENNICTWO

1. Nieoczym A.: Modelowanie procesu wkręcania łączników gwintowych – Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, vol. 20, nr 2, 2000, s. 121-131.
2. Nieoczym A.: Wybrane zagadnienia wytrzymałościowe połączeń gwintowych. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2003, ISBN 83-87833-43-6. Monografia.
3. Nieoczym A.: Effect of tightening method on tension in bolts. Tribologia, nr 2, 2005.

4. Szabajkowicz W., Nieoczym A.: Montażowe połączenia gwintowe. **Monografia.** Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009. ISBN 978-83-7199-560-6.

ENERGY BALANCE OF THE WORK SCREWING-IN HEAD

Summary

The tolerance of turning force is defined by accuracy of calculated parameters which are the function of torque. There are two factors influencing the value of torque: the angle of tightening up the threaded fastener and its angle rigidity. Simulation of a device working circumstances necessitates choosing the optimal speed of turning and tightening up which gives the maximal productivity at given tightening speed. In the real process circumstances the moment of inertia value of the power transmission and working elements influences the tightening phase. The article describes how this parameter influences the value of tightening angle and the influence of the working elements speed stabilization error on a change of tightening angle. The time of tightening optimal criteria with limits related to angular velocity of working elements are shown. The factors influencing the value of torsional rigidity of the threaded fastener are described in the article.

Keywords: screwing impulse, angle of tightening up, angle rigidity, moment of torque.