

Eugeniusz BLIŹNICKI, Tadeusz TYRLIK

SZTYWNOŚĆ STATYCZNA HYDRAULICZNEGO SUPORTU
KOPIUJĄCEGO TYPU TKB-10

Streszczenie. Przedstawiono rozważania teoretyczne oraz wyniki pomiarów sztywności statycznej suportu kopiującego typu TKB-10 stanowiącego wyposażenie specjalne tokarki uniwersalnej TUB-32. Przyjęty zakres badań pozwolił na ocenę wpływu na sztywność takich parametrów, jak: ciśnienie zasilania i temperatura oleju roboczego. Przeprowadzone równocześnie pomiary przemieszczeń wrzeciona i konika pozwoliły na określenie możliwej do uzyskania dokładności obróbki.

1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych czynników decydujących o dokładności obróbki na tokarce wyposażonej w urządzenie kopiujące jest sztywność sprzężysta i stykowa całego układu roboczego obrabiarka - urządzenie kopiujące - narzędzie - przedmiot.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie sztywności następujących węzłów sprzężysto-stykowych:

- prowadnice tokarki i jej suport,
- sanie suportu kopiującego,
- układ wykonawczy hydraulicznego urządzenia kopiującego,
- wrzeciono i konik tokarki.

Wszystkie wymienione wyżej węzły charakteryzują się pewną podatnością w wyniku działania sił zewnętrznych, wyrażającą się przemieszczeniem narzędzia względem obrabianego przedmiotu. W praktyce zjawisko to ujmowane jest tzw. wskaźnikiem sztywności zdefiniowanym zależnością:

$$j = \frac{\Delta P}{\Delta f} \left[\frac{N}{\mu m} \right] \quad (1)$$

gdzie:

ΔP - przyrost siły obciążającej [N],

Δf - przyrost przemieszczenia [μm] w kierunku działania siły obciążającej ΔP .

Przy obróbce toczeniem decydujący wpływ na dokładność posiada siła odporowa P_y . Jeżeli jako przemieszczenie przyjmie się zmianę położenia

narzędzia Δy , to zgodnie z zależnością (1) określona zostanie sztywność ogólna j_0 układu suport obrabiarki - suport kopiujący

$$j_0 = \frac{\Delta P}{\Delta y} \left[\frac{N}{\mu m} \right] \quad (2)$$

W powyższym wzorze przemieszczenie Δy mierzone jest w stosunku do prowadnic obrabiarki.

Mierząc przemieszczenie narzędzia Δy_{sk} w stosunku do podstawy sań suportu kopiującego, można określić wskaźnik sztywności suportu kopiującego j_{sk} wg wzoru:

$$j_{sk} = \frac{\Delta P}{\Delta y_{sk}} \left[\frac{N}{\mu m} \right] \quad (3)$$

Dla suportu kopiującego można również określić wskaźnik sztywności hydraulicznej j_h związany z wzajemnym przemieszczeniem Δe suwaka sterującego względem jego obudowy

$$j_h = \frac{\Delta P_h}{\Delta e} \left[\frac{N}{\mu m} \right] \quad (4)$$

gdzie:

ΔP_h - przyrost siły obciążającej odporowej działającej wzdłuż sań suportu kopiującego.

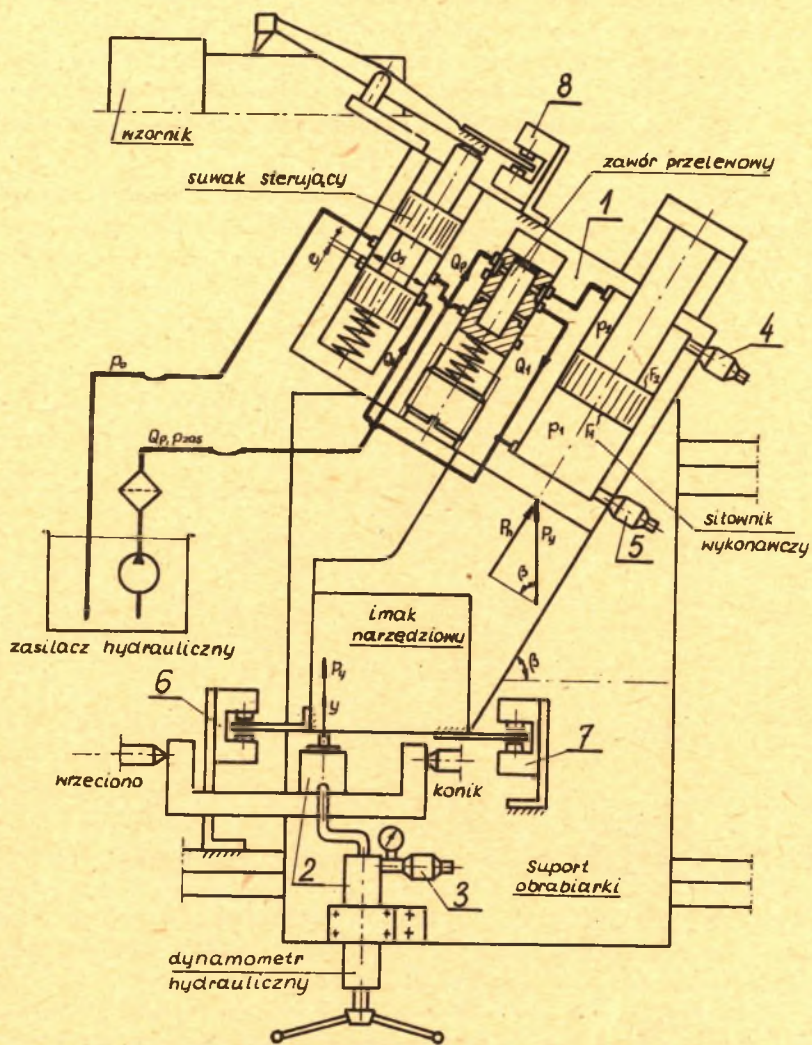
Pomiary sztywności przeprowadzono na tokarce uniwersalnej TUB-32 wyposażonej w hydrauliczne urządzenie kopiujące typu TKB-10 [1] o następujących danych technicznych:

- czujnik sterujący jednokrędkowy,
- siłownik hydrauliczny z jednostronnym tłoczykiem,
- nominalne ciśnienie zasilania $p = 20 \text{ bar} = 20 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$
- wydajność pompy zasilającej $Q_p = 8,335 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 5 \text{ l/min.}$
- średnica cylindra $D = 70 \text{ mm}$,
- średnica tłoczyska $d = 50 \text{ mm}$,
- średnica tłoczka sterującego $d_s = 25 \text{ mm}$,
- pochylenie sań suportu kopiującego w stosunku do osi obrabiarki $\beta = 60^\circ$.

2. Budowa i opis stanowiska pomiarowego

Schemat układu pomiarowego pokazano na rys. 1, na którym oznaczono:

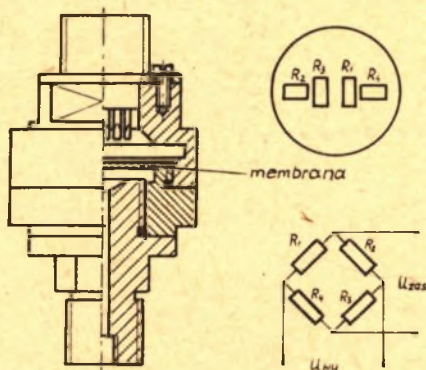
- 1 - badany suport kopiujący,
- 2 - dynamometr hydrauliczny przeznaczony do obciążenia układu siłą P_y ,



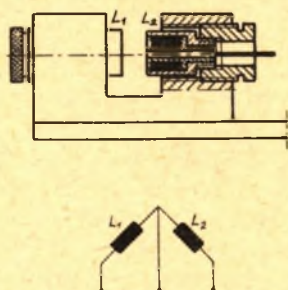
Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

- 3, 4, 5 - czujniki tensometryczne do pomiaru ciśnień w dynametrze hydraulicznym oraz w obydwu komorach cylindra (p_d, p_2, p_1),
 6, 7, 8 - czujniki indukcyjne do pomiaru przemieszczeń imaka narzędziowego względem łoża obrabiarki, imaka narzędziowego względem płyty suportu oraz względnego przemieszczenia suwaka sterującego i tulei ($\Delta y, \Delta y_{ek}, \Delta e$).

Siłę obciążającą P_y uzyskuje się za pomocą dynamometru hydraulicznego produkcji IOS Kraków [3]. Dynamometr posiada siłownik czynny i bierny o powierzchni czynnej $F = 10 \text{ cm}^2$, dając tym samym siłę 100 N na 1 bar.



Rys. 2. Schemat czujnika pomiaru ciśnienia



Rys. 3. Schemat czujnika pomiaru przemieszczenia

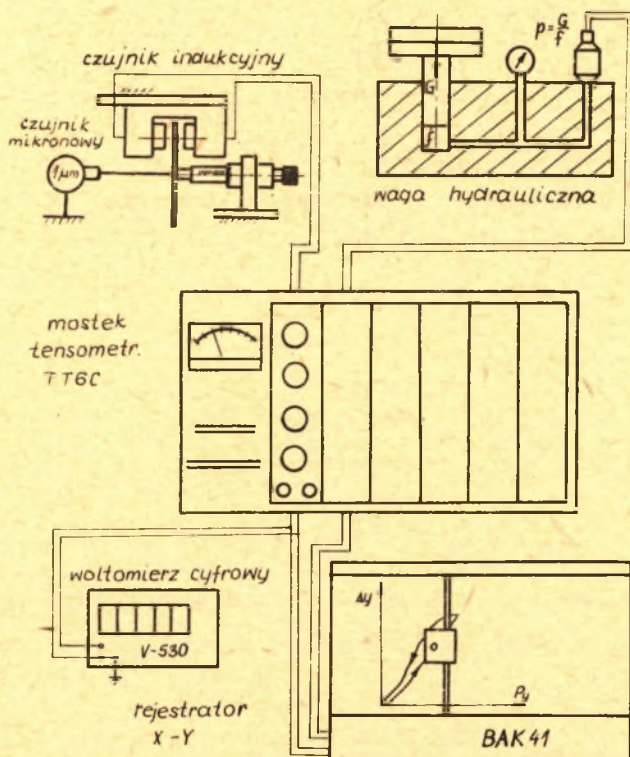
Do pomiaru ciśnień użyto czujników membranowych z naklejonymi tensometrami w układzie pełnego mostka (rys. 2) i zakresie pomiarowym 0÷63 bar.

Przemieszczenia mierzono za pomocą czujników indukcyjnych własnej konstrukcji w układzie półmostka (rys. 3).

Zestaw aparatury pomiarowej użytej w czasie wzorcowania czujników oraz pomiarów sztywności pokazano na rys. 4.

W czasie wzorcowania sygnały napięciowe z czujników przekazywane są na mostek tensometryczny typu TT6c a następnie na woltomierz cyfrowy V530.

W czasie pomiarów sztywności wyjścia z mostka wprowadzono na rejestrator X-Y typu BAK 41, przy czym na oś X wprowadzono wartość ciśnienia p_d proporcjonalnego do siły obciążającej P_y , natomiast na oś Y kolejne przemieszczenie oraz ciśnienia w obydwu komorach cylindra.



Rys. 4. Zestaw aparatury pomiarowej

3. Analityczne określenie wskaźnika sztywności hydraulicznego suportu kopiującego

W czasie torzenia wzdłużnego, w układzie kopiującym zarówno przez zawór jak i suwak sterujący przepływa olej roboczy o natężeniu równym natężeniu pompy Q_p . Występujące w rzeczywistości straty wolumetryczne pompy i układu są niewielkie, wobec czego można je pominąć przyjmując $Q_p = \text{const}$.

Równanie ciągłości przepływu przez suwak sterujący w stanie ustalonym ma postać:

$$Q_p = \alpha \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{P_1 - P_0}, \quad (5)$$

gdzie:

- α - współczynnik przepływu przez suwak sterujący,
- f - przekrój przepływu przez suwak sterujący [m^2],

- gęstość oleju roboczego $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$,

p_1 - ciśnienie w beztłoczkowej komorze cylindra $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$,

p_0 - ciśnienie w zbiorniku $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$, $p_0 = 0$.

Przekrój przepływu przez suwak sterujący cylindryczny o krawędziach prostokątnych wyraża się zależnością:

$$f = \pi \cdot d_s \cdot e \quad (6)$$

gdzie:

e - otwarcie suwaka sterującego [m],

d_s - średnica suwaka sterującego [m].

Równanie równowagi siłownika ma postać:

$$p_1 \cdot F_1 = p_2 F_2 + P_h \quad (7)$$

Obliczając ciśnienie p_1 z zależności (7) oraz wykorzystując związek geometryczny $F_2 = 0,5 F_1$ otrzymano:

$$p_1 = 0,5 \cdot p_2 + \frac{P_h}{F_1} \quad (8)$$

Wstawiając zależności (6) oraz (8) do wzoru (5) otrzymano:

$$Q_p = \alpha \cdot \pi \cdot d_s \cdot e \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{0,5 p_2 + \frac{P_h}{F_1}} \quad (9)$$

Otwarcie suwaka sterującego w funkcji obciążenia wyliczone ze wzoru (9) jest równe:

$$e = \frac{Q_p}{\alpha \cdot \pi \cdot d_s \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \cdot \frac{\sqrt{F_1}}{\sqrt{0,5 \cdot p_2 \cdot F_1 + P_h}} \quad (10)$$

Otwarcie początkowe suwaka sterującego odpowiadające obciążeniu $P_h = 0$ wynosi:

$$e_0 = \frac{Q_p}{\alpha \cdot \pi \cdot d_s \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{0,5 p_2}} \quad (11)$$

Wartości liczbowe parametrów rzeczywistych układu kopiującego TKB 10 są równe:

$$Q_p = 8,335 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad p_2 = 20 \text{ bar} = 20 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$d_e = 0,025 \text{ m}, \quad F_1 = \frac{\pi D^2}{4} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

W temperaturze $t = 40^\circ\text{C}$ gęstość oleju $\rho = 905 \text{ kg/m}^3$. Zakładając turbulenty przepływ oleju roboczego przez suwak sterujący przyjęto wartość współczynnika przepływu $\alpha = 0,58$.

Wyrażenie $0,5 p_2 F_1 = 3850 \text{ N}$ stanowi w rozważanym układzie maksymalne obciążenie zewnętrzne $P_{h \text{ max}}$. Po wstawieniu poszczególnych wartości do wzoru (11) otrzymano otwarcie początkowe $e_0 = 38,9 \mu\text{m}$. Otwarcie suwaka sterującego w funkcji obciążenia P_h wyraża się teraz zależnością:

$$e = e_0 \sqrt{\frac{3850}{3850 + P_h}} = 38,9 \cdot \sqrt{\frac{3850}{3850 + P_h}} [\mu\text{m}] \quad (12)$$

Teoretyczny wskaźnik sztywności hydraulicznej określony na podstawie równanie (12) wynosi:

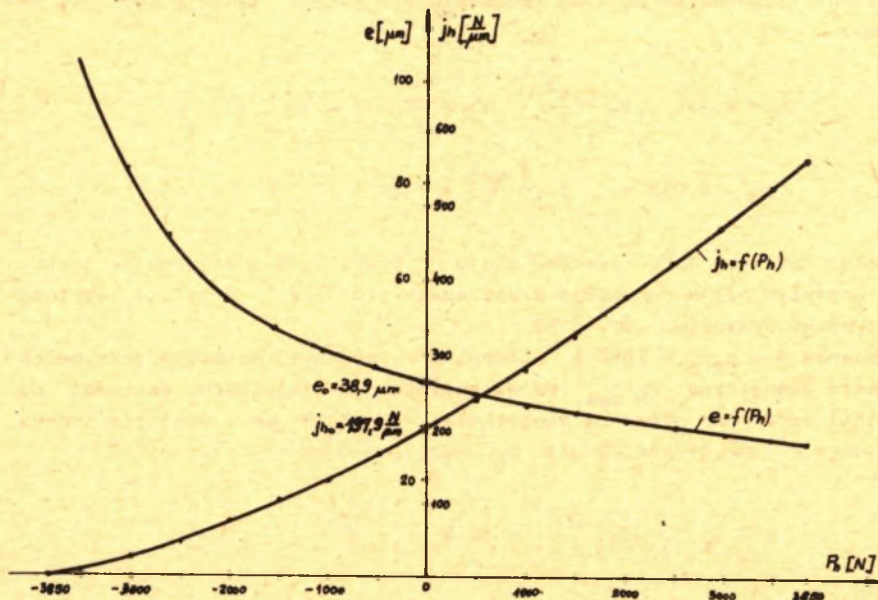
$$j_h = \frac{dP_h}{de} = - \frac{2}{e_0} \cdot \sqrt{\frac{(3850 + P_h)^3}{3850}} \left[\frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \right] \quad (13)$$

Wartość otwarcia suwaka sterującego e oraz sztywności hydraulicznej j_h przedstawiono graficznie na rys. 5. Siłę obciążającą działającą wzdłuż osi euportu kopiującego należy określić ze związku geometrycznego

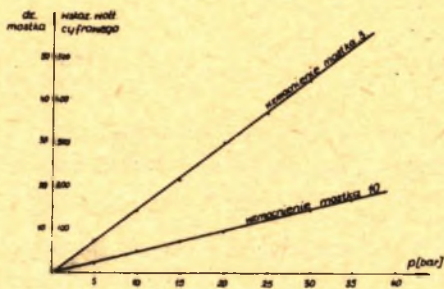
$$P_h = P_y \cdot \cos 60^\circ = 0,866 \cdot P_y \quad (14)$$

4. Przebieg badań oraz wyniki pomiarów

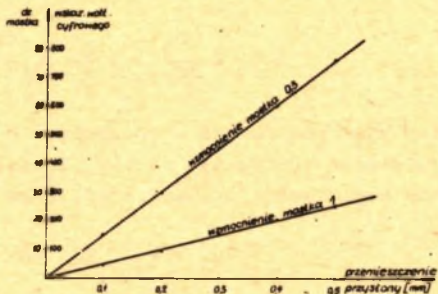
Przed przystąpieniem do wyznaczania charakterystyk sztywności dokonano wzorcowania wszystkich czujników pomiarowych. Czujniki pomiaru przemieszczeń wzorcowano za pomocą czujnika zegarowego o działce elementarnej $1 \mu\text{m}$. Do wzorcowania czujników pomiaru ciśnień użyto wagi hydraulicznej. Charakterystyki czujników pokazano na rys. 6 i 7. W następnej kolejności rejestrowano poszczególne przemieszczenia oraz ciśnienia w funkcji obciążenia P_y . Obciążenie zmieniano w zakresie $0+3000 \text{ N}$.



Rys. 5. Teoretyczne wykresy zależności $\Delta e = f(P_h)$, $j_h = f(P_h)$



Rys. 6. Charakterystyka czujnika pomiaru ciśnienia

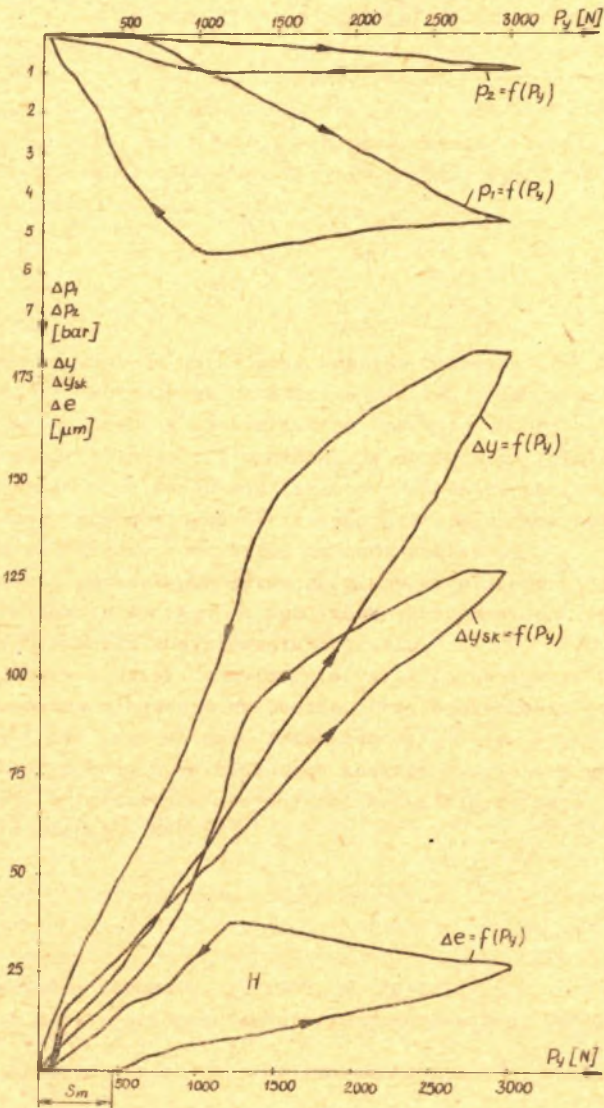


Rys. 7. Charakterystyka czujnika pomiaru przemieszczenia

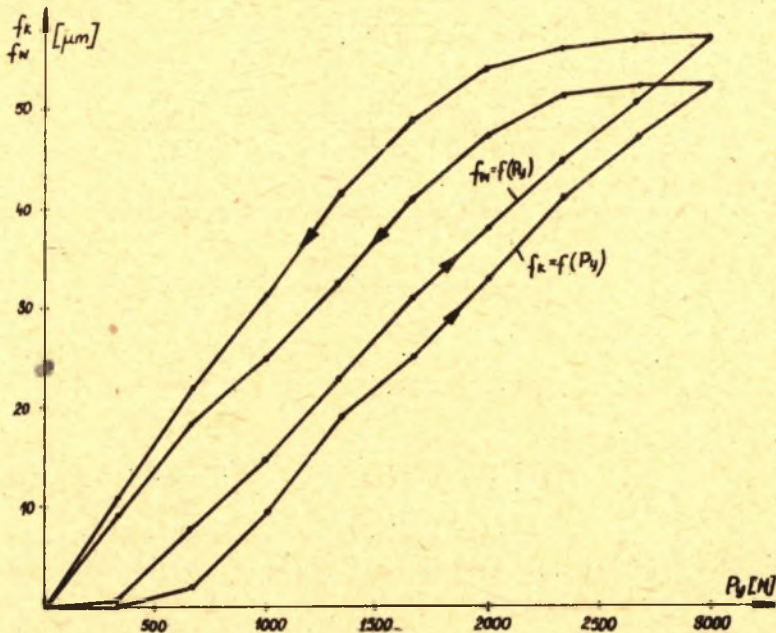
Pomiary sztywności wykonano w następujących zmiennych warunkach:

- ciśnienie zasilania $p_2 = 20, 17, 14, 11$ bar,
- temperatura oleju roboczego $t = 26, 34, 42, 50^\circ\text{C}$.

Typowy przebieg charakterystyk sztywności pokazano na rys. 8. Dodatkowo dokonano pomiarów przemieszczenia wrzeciona i konika obrabiarki za pomocą czujników zegarowych obciążając układ siłą P_y w zakresie 0+3000 N. Charakterystyki sztywności wrzeciona i konika pokazano na rys. 9.



Rys. 8. Typowe charakterystyki sztywności i zmian ciśnienia w funkcji obciążenia



Rys. 9. Charakterystyki sztywności wrzeciona i konika.

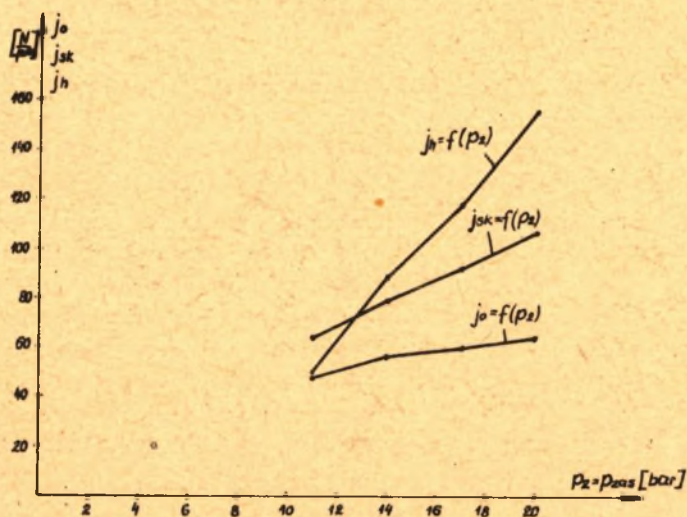
5. Wnioski z przeprowadzonych pomiarów

Kilkakrotnie przeprowadzone pomiary sztywności urządzenia kopiującego TKB-10 i opracowane na tej podstawie wyniki badań pozwalają na wysunięcie następujących wniosków:

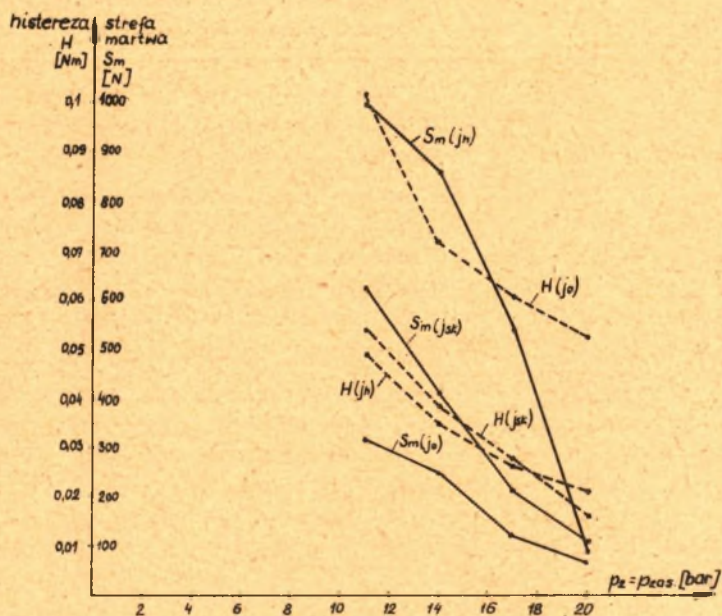
5.1. Dokładność obróbki przy toczeniu kopiowym, uwarunkowana jest głównie podatnością części mechanicznej układu obrabiarka - suport kopiujący - przedmiot - narzędzie. Odpowiednie wskaźniki sztywności określone w oparciu o pomiary przy $p_2 = 20 \text{ bar}$ i $t = 38^\circ\text{C}$ są równe:

- wskaźnik sztywności ogólnej suportu $j_o = 32,5 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$,
- wskaźnik sztywności urządzenia kopiującego $j_{ek} = 53 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$,
- wskaźnik sztywności hydraulicznej $j_h = 155 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$,
- wskaźnik sztywności wrzeciona $j_w = 22 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$,
- wskaźnik sztywności konika $j_k = 23 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$.

5.2. Zmiana ciśnienia zasilania (rys. 10) posiada największy wpływ na zmianę wskaźnika sztywności hydraulicznej $12 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$ na 1 bar. Znacznie mniej zmienia się wskaźnik sztywności suportu kopiującego $4 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$ na 1 bar, najmniej wskaźnik sztywności ogólnej $1,5 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$ na 1 bar ciśnienia zasilania.



Rys. 10. Wpływ ciśnienia zasilania na wskaźniki sztywności

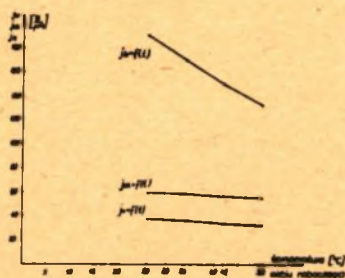


Rys. 11. Wpływ ciśnienia zasilania na pętlę histerezy i strefę martwą

W rozważanym zakresie zmian ciśnienia zasilania zmiana wskaźników sztywności jest w przybliżeniu liniowa.

5.3. Zmniejszenie ciśnienia zasilania (rys. 11) powoduje zwiększenie pętli histerezy na wykresach sztywności (rys. 8) oraz zwiększenie strefy martwej Sm. Pętla histerezy H świadczy o stratach energetycznych w rozważanym układzie, wynikłych głównie z istnienia sił tarcia i luzów.

5.4. Wzrost temperatury oleju roboczego (rys. 12) powoduje zmniejszenie wskaźnika sztywności hydraulicznej o $29 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}$ na 10°C . Zmiana wskaźnika sztywności hydraulicznej spowodowana jest głównie zmianą współczynnika przepływu, będącego funkcją liczby Reynolda odwrotnie proporcjonalnej do lepkości kinematycznej oleju roboczego [4]. Wpływ temperatury na wskaźniki j_{sk} i j_o jest nieznaczny.



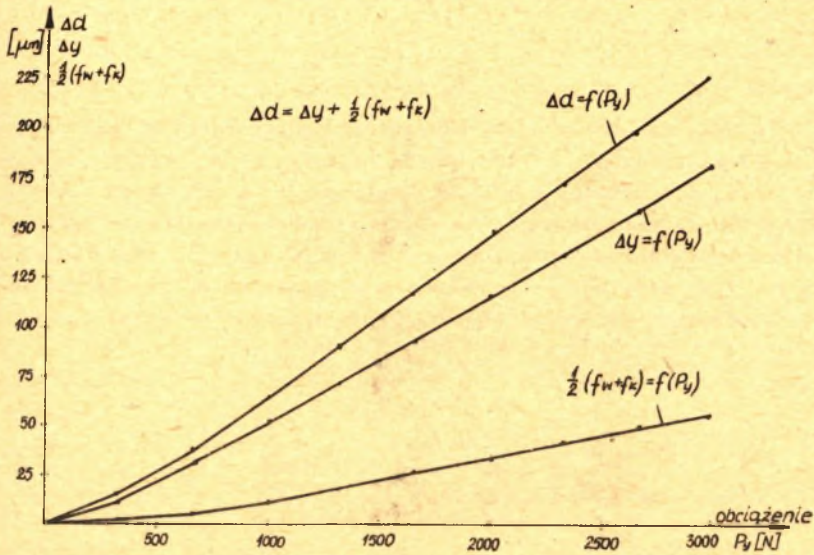
Rys. 12. Wpływ temperatury na wskaźniki sztywności

5.5. Zmiana obciążenia zewnętrznego w zakresie $0-3000 \text{ N}$ (rys. 8) powoduje zmianę ciśnienia zasilania p_2 w tłoczkowej komorze cylindra o $0,9 \text{ bar}$. W tych samych warunkach ciśnienie p_1 w beztłoczkowej komorze cylindra zmienia się o $5,42 \text{ bar}$.

Zmiana ciśnienia p_1 nie jest zgodna z równaniem (11) ze względu na wpływ sił tarcia ujawniony w czasie badań na modelu rzeczywistym. Ten sam czynnik jest przyczyną znacznej histerezy na wykresach zmian ciśnienia p_1 w funkcji obciążenia.

5.6. Różnice ciśnień i sztywności pomiędzy wartościami obliczeniowymi (teoretycznymi) i zmierzonymi wskazują wyraźnie na duży wpływ takich czynników, jak: luzy w prowadnicach, podatność sprężyste w układzie kształtowania oraz siły tarcia. Przy ocenie teoretycznej przebiegu zjawisk w opisywanym problemie nie można zatem pomijać wpływu tych wielkości. W opisie teoretycznym są one jednak przeważnie trudne do uwzględnienia.

5.7. Niedokładność obróbki średnic przy toczeniu kopiowym w warunkach statycznych jest sumą przemieszczeń imaka narzędziowego, wrzeciona i konika oraz przedmiotu obrabianego. Nie uwzględniając podatności przedmiotu obrabianego, przy sile obciążającej $P_y = 3000 \text{ N}$ błąd statyczny jest równy $227 \mu\text{m}$. Zależność spodziewanej dokładności wymiarów średnicowych w funkcji obciążenia zewnętrznego przy $p_2 = 20 \text{ bar}$ i $t = 40^\circ\text{C}$ przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13. Statyczna dokładność obróbki średnic w funkcji obciążenia

LITERATURA

- [1] Urządzenia kopiujące TKB-10 - Dokumentacja techniczno-ruchowa.
- [2] Batech A.: Projektowanie hydraulicznych układów kopiujących. Mechanik 4/1975.
- [3] Tyrlik T., Wiercioch W.: Sztwywność statyczna obrabiarek. Skrypt Politechniki Śląskiej - Gliwice 1975.
- [4] Guillon M.: Teoria i obliczanie układów hydraulicznych. WNT, Warszawa 1967.
- [5] Wrotny L.T.: Podstawy budowy obrabiarek, WNT, Warszawa 1973.

СТАТИЧЕСКАЯ ЖЕСТКОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО
КОПИРОВАЛЬНОГО СУПОРТА ТИПА ТКВ-10

Резюме

Представляются теоретические рассуждения и результаты измерений статической жесткости копировального супорта типа ТКВ-10 являющегося специальным оборудованием универсального токарного станка ТУВ-32. Принятый диапазон исследований дал возможность оценить влияние на жесткость таких параметров как: давление питания и температура рабочего масла. Проведенные одновременно измерения перемещений шпиндельной и задней бабок дали возможность определить точность обработки, которую можно получить на данном станке.

STATIC RIGIDITY OF A HYDRAULIC COPYING MECHANISM
OF TKB-10 TYPE

S u m m a r y

There have been presented some theoretical considerations as well as the results of measurements on the static rigidity of a TKB-10 copying mechanism, which constitutes a special equipment of a universal lathe TUB-32. The assumed investigation range allowed to estimate the influence of such parameters as the feed pressure and the working oil temperature on the rigidity. The simultaneous measurement of spindle and tailstock displacements enabled to determine the available accuracy of a lathe work.