

WPLYW SPRĘŻYSTOŚCI ZĘBÓW KULTYWATORA NA JAKOŚĆ I EFEKTYWNOŚĆ SPULCHNIANIA GLEB GLINASTYCH

*Krzysztof Lejman, Zygmunt Owsiak, Krzysztof Pieczarka
Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu*

Leszek Kordas

Katedra Kształtowania Agroekosystemów, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań wpływu sprężystości zębów kultywatora na wartość wskaźników jakości i efektywności spulchnienia gleby przy czterech poziomach głębokości i prędkości skrawania. Pomiary pola powierzchni przekroju spulchnianej gleby i oporu skrawania konieczne do wyznaczenia wskaźników przeprowadzono w warunkach polowych w glinie piaszczystej i glinie ilastej przy wilgotnościach wynoszących odpowiednio 11,2 i 15,6%. Stwierdzono, że wzrost wartości wskaźnika sprężystości zęba powoduje paraboliczny przebieg wskaźników jakości i efektywności spulchnienia, niezależnie od gatunku gleby oraz głębokości i prędkości skrawania. Wskaźniki sprężystości zębów, przy których uzyskuje się najwyższą jakość i efektywność spulchnienia, maleją potęgowo wraz ze wzrostem prędkości i głębokości skrawania, niezależnie od gatunku gleby.

Słowa kluczowe: gleba, doprawianie, kultywator, sprężystość zęba, jakość spulchnienia

Wprowadzenie

Pomimo obserwowanego w ostatnich latach wprowadzania do uprawy i doprawiania gleby wieloczynnościowych agregatów nadal stosuje się standardowe kultywatory wyposażone w zęby sprężynowe. W zdecydowanej większości przypadków producenci maszyn i narzędzi przeznaczonych do uprawy i doprawiania gleby, w tym kultywatorów, polecają swoje wyroby ze względu na wysoką jakość oddziaływania na glebę bez podania wartości parametrów charakteryzujących jakość spulchnienia. Dotyczy to zwłaszcza wpływu na jakość spulchnienia podstawowych parametrów konstrukcyjnych narzędzia, w tym również sprężystości elementu, do którego zamocowane jest narzędzie.

Skrawanie gleby wąskimi elementami sprężystymi charakteryzuje się występowaniem dwóch stref deformacji (Godwin i O'Dogherty, 2007) oraz drgań samowzbudnych, przy czym drgania te są skutkiem zmiennego chwilowego oporu gleby i przyczyniają się do

wzrostu efektu spulchniania. Parametry tych drgań (amplituda, częstość) uzależnione są głównie od zmienności gleby i parametrów sprężystości zęba (Mieszkalski, 1998). Jak wynika z badań Niyamapa i Salokhe (2000) amplituda i częstość drgań wymuszonych wpływają istotnie na zmianę przyrostu pola powierzchni przekroju poprzecznego skrawanej gleby, co przekłada się bezpośrednio na jakość spulchnienia, przy czym autorzy ci stwierdzili, że wprawione w drgania narzędzie charakteryzuje się lepszą jakością spulchnienia niż narzędzie niedrgające. Należy się więc spodziewać, że w przypadku skrawania gleby zębami sprężynowymi charakteryzującego się występowaniem drgań samowzbudnych (Duerinckx, 2005), parametry sprężystości elementów skrawających mogą mieć wpływ na jakość spulchnienia wyrażoną względnym przyrostem przekroju skrawanej gleby. Ponieważ przyrosty te bezpośrednio odpowiadają względnym spadkom gęstości objętościowej gleby (McKyes i Maswaure, 1997), więc możliwe jest wyznaczenie gęstości po uprawie oraz porównanie jej z wartościami optymalnymi i progowymi determinującymi prawidłowy wzrost i plonowanie roślin (Paluszek, 2011; Buliński i in., 2009).

Celem badań było wyznaczenie wpływu sprężystości zębów kultywatora na jakość i efektywność spulchnienia gleb gliniastej piaszczystej i gliniastej ilastej z uwzględnieniem zmian prędkości i głębokości skrawania.

Zakres, metody i warunki badań

Badania jakości i efektywności spulchnienia przeprowadzono w warunkach polowych na glebach o uziarnieniach wg PTG (2008) gliny piaszczystej (żwir - 4%, piasek - 67%, pył - 18%, il - 18%) i gliny ilastej (żwir - 3%, piasek - 29%, pył - 41%, il - 27%) oraz wilgotnościach wynoszących odpowiednio 11,2% i 15,6%. Przed przystąpieniem do badań wykonano orkę na głębokość 25 cm, a następnie gleby doprawiano i wałowano. Podstawowe parametry charakteryzujące stan gleb przygotowanych do badań przedstawiono w tabeli 1. Gęstość objętościową i wilgotność wyznaczano zgodnie z normami ISO 11508 (1998) i ISO 11461 (2001). Wytrzymałość na ścinanie mierzono sondą skrzydełkową VANE H-60, natomiast zwięzłość – zwięzłościomierzem z napędem mechanicznym stosując sondę o kącie wierzchołkowym 60° i polu podstawy 0,0003 m², przy prędkości zagłębiania 0,03 m s⁻¹. Stwierdzone niewielkie różnice w wartościach parametrów wytrzymałościowych gleb były wynikiem różnych ich wilgotności i podatności na zagęszczanie. Wszystkie pomiary wykonano w ośmiu powtórzeniach.

Tabela 1

Parametry opisujące stan gleb

Table 1

Parameters describing the condition of soil

Parametr	Gatunek gleby	
	Gлина piaszczysta	Gлина ilasta
Gęstość objętościowa (kg·m ⁻³)	1470 (30)	1590 (20)
Wytrzymałość na ścinanie (kPa)	44 (8)	43 (9)
Zwięzłość (kPa)	600 (70)	520 (40)

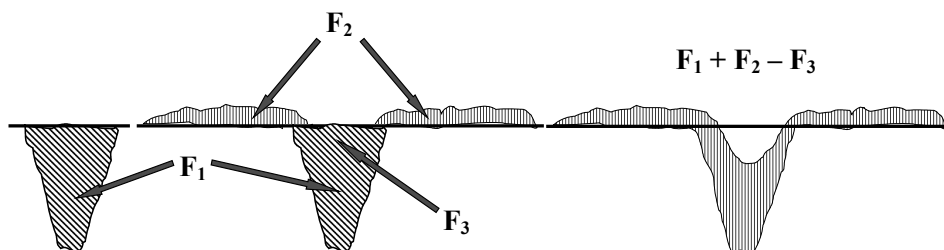
W nawiasach zamieszczono odchylenia standardowe pomiarów.

Obiektami badań były cztery esowe zęby kultywatora charakteryzujące się różnymi wskaźnikami sprężystości. Zęby były wyposażone w redliczki o szerokości 45 mm, promieniu krzywizny 170 mm i kącie wzniosu 40°. Różne parametry sprężystości zębów uzyskano zmieniając ich kształty i wielkości pola przekroju. Zęby poddano statycznym badaniom na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566 wyznaczając wpływ obciążenia na wartości poziomych i pionowych przemieszczeń.

Spulchnienia gleby, z jednoczesnym pomiarem oporu skrawania i pomiarem rzeczywistej głębokości pracy, dokonano przy użyciu stanowiska do badania sił działających na elementy skrawające glebę warunkach polowych. Opis stanowiska oraz dokonane w nim modyfikacje przedstawiono odpowiednio w pracach Lejmana i Owsiaaka (1993) oraz Lejmana i in. (2013). Błąd pomiaru oporu skrawania wynosi 5 N, a głębokości skrawania – 1 cm.

Jakość spulchnienia gleby wyznaczano zgodnie z normą PN-90/R-55021 (1990) i metodyką stosowaną przez McKyes'a i Maswauere (1997). Zgodnie z przedstawionymi metodami wskaźnik jakości spulchnienia obliczano w oparciu o wyznaczone pola powierzchni przekroju wypiętrzanej gleby ($F_2 - F_3$) i obliczone powierzchnie przekroju skrawania (F_1), co zilustrowano na rysunku 1. Szczegółową metodykę wyznaczania przyrostów przekroju spulchnionej gleby przedstawiono w pracy Lejmana i in. (2013). Wskaźnik jakości spulchnienia (p) wyznaczono jako proporcję przyrostu powierzchni przekroju gleby do całkowitej powierzchni spulchnienia:

$$p = \frac{F_2 - F_3}{F_2 - F_3 + F_1} \quad (1)$$



Rysunek 1. Przekroje poprzeczne gleby skrawanej zębem kultywatora: oznaczenia w tekście
Figure 1. Cross-sections of soil cutting with the cultivator tine: symbols as in the text

Przekrój skrawania (F_1) obliczano uwzględniając szerokość narzędzia (s), zarejestrowaną głębokość skrawania (a) i kąty tarcia wewnętrznej gleby (ρ), które wynosiły 33° i 21° odpowiednio dla gliny piaszczystej i gliny ilastej:

$$F_1 = a \cdot (s + a \cdot \tan \rho) \text{ (cm}^2\text{)} \quad (2)$$

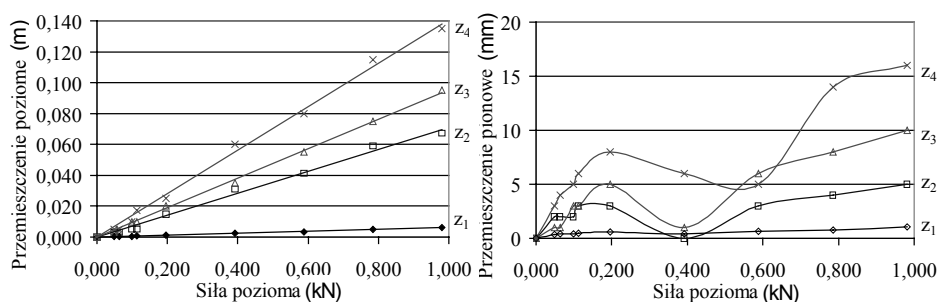
Wskaźnik efektywności spalchnienia (k) obliczano dzieląc wartość wskaźnika jakości spalchnienia (p) przez średnią wartość oporu skrawania gleby zębem (F_x):

$$k = \frac{p}{F_x} \quad (\text{kN}^{-1}) \quad (3)$$

Wpływ sprężystości zębów na jakość i efektywność spalchnienia wyznaczono dla czterech prędkości skrawania (1,0; 1,7; 2,4; 3,0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) i stałej głębokości – 12 cm oraz czterech głębokości skrawania (6, 8, 10 i 12 cm) przy stałej prędkości wynoszącej 3,0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Wyniki badań

Wyznaczone w warunkach statycznych na maszynie wytrzymałościowej przemieszczenia poziome i pionowe dziobów redliczek zamocowanych na poszczególnych zębach ($z_1 - z_4$) przy rosnących wartościach obciążenia poziomego przedstawiono na rysunku 2. Zarejestrowane w trakcie badań wartości oporów skrawania nie przekraczały 600 N. Można więc stwierdzić, że pionowe przemieszczenia elementów skrawających (rys. 2B) nie przekraczały 8 mm. Oznacza to, że zmiany głębokości skrawania spowodowane odginaniem zębów w trakcie ich pracy były mniejsze od błędu pomiaru głębokości pracy (1 cm), co umożliwia pominięcie wpływu zmienności przemieszczenia pionowego w dalszej analizie. Stwierdzone przebiegi odkształcenia poziomego w funkcji obciążenia mają charakter liniowy, przy czym wartości współczynników kierunkowych prostych regresji przyjęto jako wskaźniki sprężystości poszczególnych zębów. Nieistotnie różniące się od zera wartości wyrazów wolnych równań oraz zbliżone do jedności współczynniki korelacji (0,9960 – 0,9988) świadczą o sprężystym odkształceniu zębów w całym zakresie występujących obciążeń. Wskaźniki sprężystości (q) dla poszczególnych zębów z_1 , z_2 , z_3 i z_4 wynosiły 0,0061, 0,0711, 0,0953 i 0,1406 $\text{m}\cdot\text{kN}^{-1}$.

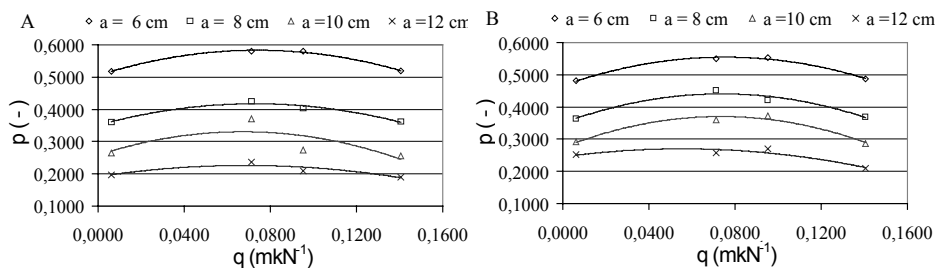


Rysunek 2. Wyniki cechowania badanych zębów kultywatora (z_1-z_4)

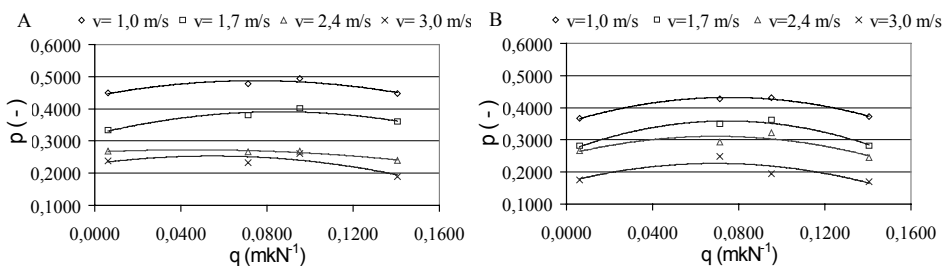
Figure 2. Results of calibration of cultivator tines (z_1-z_4)

Wzrost sprężystości zębów powoduje zarówno w glinie piaszczystej, jak i w glinie ilastej, początkowo wzrost, a następnie spadek wskaźnika jakości spalchnienia, niezależnie od głębokości skrawania (rys. 3) i prędkości skrawania (rys. 4). Dla analogicznych spręży-

stości zębów można zaobserwować zmniejszenie wskaźnika jakości spulchnienia zarówno przy wzroście głębokości, jak i prędkości skrawania, a przedstawione tendencje wyjaśniono w pracy Lejmana i in. (2013). Wpływ wskaźnika sprężystości na wartość wskaźnika jakości spulchnienia opisano równaniami parabol o ogólnej postaci $p=A \cdot q^2+B \cdot q+C$. Wartości poszczególnych współczynników (A, B, C) wraz ze współczynnikami korelacji (R) przedstawiono w tabeli 2. Stwierdzono, że w zdecydowanej większości przypadków korelacje są istotne na poziomie prawdopodobieństwa $\alpha=0,1$. Biorąc pod uwagę wartości współczynników korelacji oraz dużą zmienność warunków glebowych, jaka występuje w badaniach polowych, można stwierdzić, że sprężystość zęba determinuje jakość spulchnienia.



Rysunek 3. Wpływ sprężystości zęba (q) na wskaźnik jakości spulchnienia (p) przy zmiennej głębokości skrawania (a): A – glina ilasta, B – glina piaszczysta
 Figure 3. Effect of the elasticity of a tine (q) on the quality of loosening index (p) at variable cutting depths (a): A – loamy clay, B – sandy clay



Rysunek 4. Wpływ sprężystości zęba (q) na wskaźnik jakości spulchnienia (p) przy zmiennej prędkości skrawania (v): A – glina ilasta, B – glina piaszczysta
 Figure 4. Effect of the elasticity of a tine (q) on the quality of loosening index (p) at variable cutting speeds (v): A – loamy clay, B – sandy clay

Tabela 2

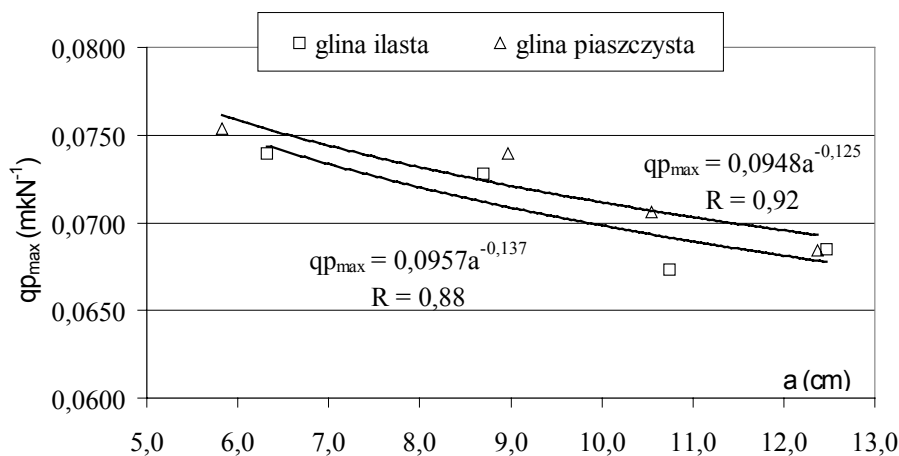
Współczynniki równań $p=A\cdot q^2+B\cdot q+C$ i współczynniki korelacji

Table 2

Coefficients of equations $p=A\cdot q^2+B\cdot q+C$ and coefficients of correlation

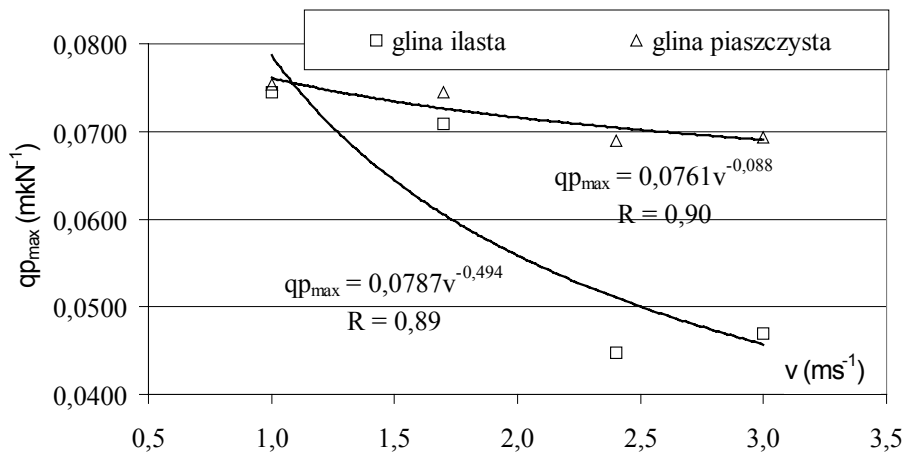
Gatunek gleby	Założona głębokość (cm)	Współczynniki równań i korelacji				Prędkość ($m\cdot s^{-1}$)	Współczynniki równań i korelacji			
		A	B	C	r		A	B	C	r
Glina piaszczysta	6	-15,5	2,34	0,47	0,99	1,0	-13,8	2,08	0,35	0,99
	8	-16,6	2,46	0,35	0,98	1,7	-17,1	2,55	0,26	0,98
	10	-18,0	2,54	0,27	0,98	2,4	-11,9	1,64	0,25	0,88
	12	-7,85	1,07	0,24	0,93	3,0	-12,0	1,67	0,17	0,85
Glina ilasta	6	-14,3	2,11	0,50	0,99	1,0	-8,53	1,27	0,44	0,93
	8	-12,5	1,82	0,35	0,98	1,7	-9,88	1,40	0,32	0,95
	10	-16,0	2,15	0,26	0,75	2,4	-3,46	0,31	0,26	0,97
	12	-7,35	1,00	0,19	0,90	3,0	-8,51	0,80	0,23	0,84

Obliczając wartość pierwszej pochodnej i przyrównując ją do zera wyznaczono ekstrema uzyskanych funkcji, a tym samym wartości sprężystości zębów, przy których występuje najwyższa wartość wskaźnika jakości spulchnienia. Wartości tych ekstremów w funkcji głębokości skrawania i prędkości skrawania przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5 i 6.



Rysunek 5. Wpływ głębokości skrawania (a) na wartości sprężystości zębów odpowiadające maksymalnym wartościom wskaźnika jakości spulchnienia (qp_{max})

Figure 5. Effect of the cutting depth (a) on the value of elasticity of tine responding to the maximum values of the quality of loosening index (qp_{max})

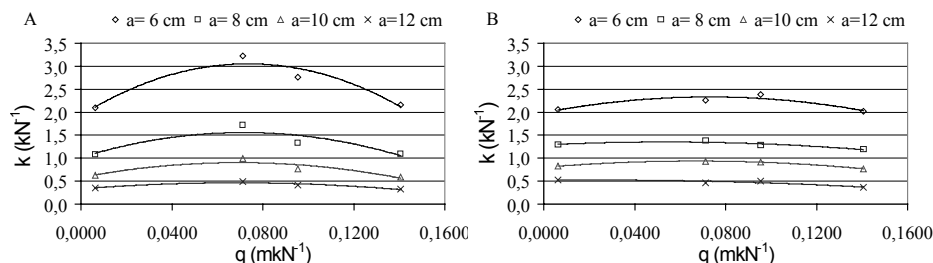


Rysunek 6. Wpływ prędkości skrawania (v) na wartości sprężystości zębów odpowiadające maksymalnym wartościom wskaźnika jakości spulchnienia (qp_{\max})

Figure 6. Effect of the cutting speed (v) on the value of elasticity of tines responding to the maximum values of the quality of loosening index (qp_{\max})

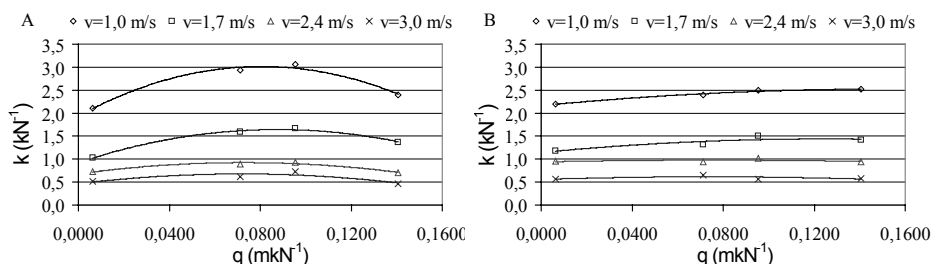
Sprężystości zębów (qp_{\max}), przy których można się spodziewać najlepszej jakości spulchnienia, maleją wraz ze wzrostem głębokości skrawania, niezależnie od gatunku gleby (rys. 5). Skrawanie przy głębokości 12 cm wymaga zastosowania zęba o sprężystości około $0,067 \text{ m}\cdot\text{kN}^{-1}$, natomiast przy 6 cm sprężystość ta powinna być wyższa i wynosić około $0,075 \text{ m}\cdot\text{kN}^{-1}$. Można również zauważyć, że nieznacznie wyższymi sprężystościami powinny się charakteryzować zęby stosowane do doprawiania gliny piaszczystej niż gliny ilastej, przy czym różnice pomiędzy tymi sprężystościami są niezależne od głębokości pracy. Celem poprawy jakości spulchnienia przy wzroście prędkości skrawania konieczne jest stosowanie zębów o mniejszej sprężystości (rys. 6). Przy prędkości około $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ można zaobserwować zbliżone wartości sprężystości, przy których w obu badanych glebach występuje najlepsza jakość spulchnienia. Dalszemu wzrostowi prędkości towarzyszy konieczność intensywniejszego zmniejszania wskaźnika sprężystości w glebie ilastej w porównaniu z glebą piaszczystą. Zarówno w przypadku wpływu prędkości, jak i wpływu głębokości, na wartość sprężystości (qp_{\max}) korelacja jest istotna na poziomie $\alpha=0,2$ dla gliny ilastej i na poziomie $\alpha=0,1$ – dla gliny piaszczystej.

Uwzględniając wartości sił działających na badane zęby kultywatora obliczono wartości wskaźników efektywności spulchnienia. Przebiegi wskaźników efektywności (k) w zależności od wskaźników sprężystości (q) przy zmiennych głębokościach skrawania przedstawiono na rysunku 7, a przy zmiennych prędkościach skrawania – na rysunku 8. Podobnie jak w przypadku jakości spulchnienia, uzyskane przebiegi charakteryzują się występowaniem wartości maksymalnych i aproksymowano je równaniami o ogólnej postaci $k=A\cdot q^2+B\cdot q+C$, a wartości współczynników równań (A , B , C) wraz ze współczynnikami korelacji przedstawiono w tabeli 3.



Rysunek 7. Wpływ sprężystości zęba (q) na wskaźnik efektywności spulchnienia (k) przy zmiennych głębokościach skrawania (a): A – glina ilasta, B – glina piaszczysta

Figure 7. Effect of the elasticity of a tine (q) on the value of loosening efficiency (k) at variable cutting depths (a): A – loamy clay, B – sandy clay



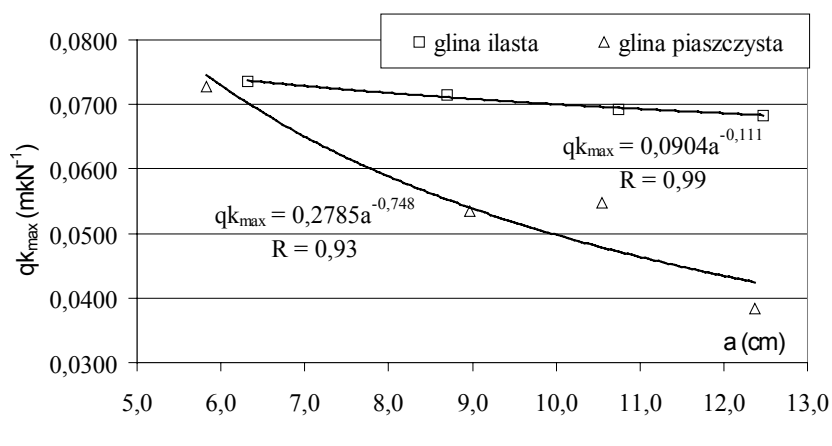
Rysunek 8. Wpływ sprężystości zęba (q) na wskaźnik efektywności spulchnienia (k) przy zmiennych prędkościach skrawania (v): A – glina ilasta, B – glina piaszczysta

Figure 8. Effect of the elasticity of a tine (q) on the value of loosening efficiency (k) at variable cutting speeds (v): A – loamy clay, B – sandy clay

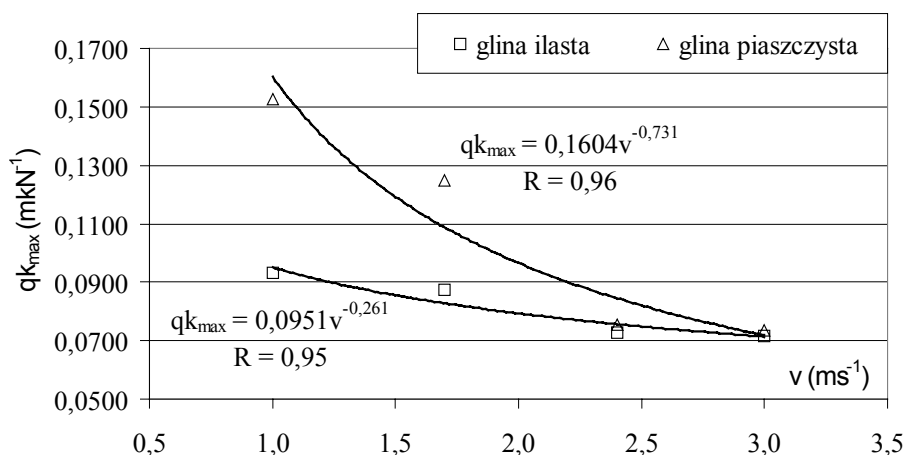
Jak można zaobserwować, podczas skrawania gliny piaszczystej przy wyższych prędkościach ($2,4$ i $3,0$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) występuje niewielki wpływ sprężystości zębów na wartość wskaźnika efektywności, o czym świadczą relatywnie małe wartości współczynników korelacji równań. Biorąc pod uwagę fakt, że w pozostałych czterech przypadkach korelacja ta jest istotna na zdecydowanie wyższym poziomie, to jednak uwzględniono współczynniki tych równań w dalszej analizie, wychodząc z założenia, że opisywane zjawisko powinno mieć ten sam charakter przebiegu niezależnie od poziomu prędkości. Sprężystości zębów odpowiadające maksymalnym wartościom wskaźnika efektywności spulchnienia ($q_{k_{\max}}$) w zależności od głębokości skrawania przedstawiono na rysunku 9. Zarówno w przypadku gliny ilastej, jak i gliny piaszczystej, wartości sprężystości ($q_{k_{\max}}$) maleją wraz ze wzrostem głębokości, co opisano funkcjami potęgowymi. Przy głębokościach skrawania wynoszących około 6 cm sprężystości zębów, przy których można się spodziewać najwyższej efektywności, są zbliżone w obu glebach i wynoszą około $0,0720$ $\text{m}\cdot\text{kN}^{-1}$. Dalszy wzrost głębokości powoduje większą intensywność spadku w glinie piaszczystej.

Tabela 3
Współczynniki równań $k=A\cdot q^2+B\cdot q+C$ i współczynniki korelacji
 Table 3
Coefficients of equations $k=A\cdot q^2+B\cdot q+C$ and coefficients of correlation

Gatunek gleby	Założona głębokość (cm)	Współczynniki równań i korelacji				Prędkość (m·s ⁻¹)	Współczynniki równań i korelacji			
		A	B	C	r		A	B	C	r
Glina piaszczysta	6	-64,7	9,42	1,99	0,92	1,0	-15,4	4,71	2,16	0,99
	8	-22,1	2,37	1,29	0,92	1,7	-18,9	4,73	1,14	0,89
	10	-34,3	3,76	0,799	0,99	2,4	-6,63	1,00	0,937	0,48
	12	-8,49	0,652	0,518	0,91	3,0	-10,7	1,57	0,557	0,59
Glina ilasta	6	-207	30,5	1,93	0,96	1,0	-157	29,2	1,94	0,99
	8	-106	15,2	1,02	0,88	1,7	-93,9	16,4	0,924	0,99
	10	-66,4	9,20	0,583	0,91	2,4	-46,0	6,71	0,679	0,98
	12	-28,5	3,90	0,331	0,96	3,0	-41,4	5,93	0,464	0,86



Rysunek 9. Wpływ głębokości skrawania (a) na wartości sprężystości zębów odpowiadające maksymalnym wartościom wskaźnika efektywności spulchnienia (qk_{max})
 Figure 9. Effect of the cutting depth (a) on the value of elasticity of tines responding to the maximum values of the efficiency of loosening index (qk_{max})



Rysunek 10. Wpływ prędkości skrawania (v) na wartości sprężystości zębów odpowiadające maksymalnym wartościom wskaźnika efektywności spulchnienia (qk_{max})

Figure 10. Effect of the cutting speed (v) on the value of elasticity of tines responding to the maximum values of the efficiency of loosening index (qk_{max})

Wzrost prędkości skrawania wymaga zmniejszania wartości wskaźnika sprężystości w celu uzyskania najlepszej efektywności spulchnienia (rys. 10). Wartości wskaźników sprężystości odpowiadające najwyższym wskaźnikom efektywności spulchnienia (qk_{max}) maleją potęgowo przy wzroście prędkości, przy czym intensywność spadków jest większa w glinie piaszczystej. Ponadto gleba ta charakteryzuje się koniecznością stosowania zębów o wyższej wartości wskaźnika sprężystości. Biorąc pod uwagę efektywność spulchnienia wskazane jest stosowanie w obu glebach zębów o zbliżonej sprężystości przy prędkościach skrawania przekraczających około $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Przedstawione wyniki badań i ich analiza sugerują, że zarówno ze względów agrotechnicznych, jak i energetycznych, wartości sprężystości zębów stosowanych w trakcie doprawiania gleby powinny być dobierane w zależności od warunków glebowych i parametrów skrawania. Analizując stwierdzone tendencje można zauważyć, że wzrost prędkości i głębokości skrawania stwarza konieczność stosowania zębów o większej sztywności, czyli mniejszej wartości wskaźnika sprężystości. Wynikający z badań istotny wpływ parametrów skrawania oraz sprężystości zęba na jakość i efektywność spulchnienia gleby można wyjaśnić wzrostem wartości oporu skrawania, który determinuje ugięcie sprężystego zęba, wzrostem parametrów wytrzymałościowych gleby przy wzroście prędkości skrawania oraz występowaniem głębokości krytycznej rozgraniczającej dwie strefy deformacji o różnych kierunkach przemieszczania gleby. Można to również hipotetycznie wyjaśnić zmianą parametrów drgań samowzbudnych, jaka towarzyszy zmianom oporu skrawania oraz zmianom sprężystości zęba.

Wnioski

1. Wzrost sprężystości zęba powoduje początkowo wzrost, a następnie spadek wskaźników jakości i efektywności spulchnienia, niezależnie od gatunku gleby oraz głębokości i prędkości skrawania, co można opisać równaniami parabolicznymi stopnia drugiego.
2. Sprężystości zębów, przy których uzyskuje się najwyższą jakość i efektywność spulchnienia, maleją potęgowo wraz ze wzrostem prędkości i głębokości skrawania, niezależnie od gatunku gleby.
3. Sprężystości zębów, przy których uzyskuje się optymalną jakość spulchnienia, są wyższe w glinie piaszczystej w porównaniu z gliną ilastą, przy zbliżonych wartościach parametrów wytrzymałościowych tych gleb.
4. Wzrost głębokości skrawania charakteryzuje się zbliżonymi gradientami spadku sprężystości odpowiadającej najwyższej jakości spulchnienia w glinie ilastej i w glinie piaszczystej, natomiast przy wzroście prędkości skrawania gradienty te są wyższe dla gliny ilastej.
5. Wzrostowi prędkości i głębokości skrawania w glinie ilastej, w porównaniu z gliną piaszczystą, towarzyszy wyższa intensywność spadku sprężystości, przy której uzyskuje się najwyższą efektywność spulchnienia.

Literatura

- Buliński, J.; Gach, S.; Waszkiewicz, Cz. (2009). Energetyczne i jakościowe aspekty procesu uprawy gleby narzędziami biernymi. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 4, 51-57.
- Duerinckx, K.; Mouzaen, A.M.; Anthonis, J.; Ramon, H. (2005). Effects of spring-tine settings and operational conditions on the mechanical performance of a weed harrow tine. *Biosystems Engineering*, 91(1), 21-34.
- Godwin, R.J.; O'Dogherty, M.J. (2007). Integrated soil tillage force prediction models. *Journal of Terramechanics*, 44, 3-14.
- Lejman, K.; Owsiak, Z. (1993). *Stanowisko do pomiaru sił działających na narzędzia pracujące w glebie*. Roczniki Nauk Rolniczych, Technika Rolnicza, T. 79-C-4, 103-106.
- Lejman, K.; Owsiak, Z.; Pieczarka, K.; Kordas, L. (2013). Wpływ eksploatacyjnych parametrów pracy zębów kultywatora na jakość spulchnienia gleby. *Inżynieria Rolnicza*, 3(146) T.2, 213-223.
- Mieszkalski, L. (1998). *Elementy matematycznego opisu wybranych zespołów narzędzi i maszyn rolniczych*. Olsztyn, Wydawnictwo ART, ISBN 83-87443-66-2.
- Niyamapa, T.; Salokhe, V.M. (2000). Soil disturbance and force mechanics of vibrating tillage tool. *Journal of Terramechanics*, 3(37), 151-166.
- McKyes, E.; Maswaure, J. (1997). Effect of design parameters of flat tillage tools on loosening of a clay soil. *Soil & Tillage Research*, 43, 195-204.
- Paluszek, J. (2011). Kryteria oceny jakości fizycznej gleb uprawnych polski. *Acta Agrophysica. Rozprawy i Monografie*, 2(191).
- ISO 11461. (2001). Soil quality - Determination of soil water content as a volume fraction using coring sleeves - Gravimetric method.
- ISO 11508. (1998). Soil quality - Determination of particle density.
- PN-90/R-55021. (1990). *Maszyny rolnicze*. Metody badań narzędzi i maszyn uprawowych.
- PTG. (2008). Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych. Pozyskano z: http://www.ptg.sggw.pl/images/Uziarnienie_PTG_2008.pdf.pdf.

EFFECT OF THE CULTIVATOR TINES ELASTICITY ON THE QUALITY AND EFFICIENCY OF CLAY SOILS LOOSENING

Abstract. Results of the research on the effect of the cultivator tines elasticity on the value of the quality indices and efficiency of soil loosening at four levels of depth and the speed of cutting were presented. Measurements of the surface area of the cross-section of the loosening soil and the cutting resistance necessary for determination of indices were carried out in the field conditions in the sandy clay and loamy clay at the respective moistures 11.2 and 15.6%. It was found out that the increase of the elasticity index value results in the parabolic course of indices of loosening quality and efficiency, regardless of the soil type and depth and speed of cutting. Indices of tines elasticity, at which the highest quality and efficiency of loosening is obtained, decrease with power series along with the increase of speed and depth of cutting, regardless the soil type.

Key words: soil, treatment, cultivator, elasticity of a loosening quality

Adres do korespondencji:

Krzysztof Lejman: e-mail: krzysztof.lejman@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chelmońskiego 37/41
51-630 Wrocław