

PROGNOZOWANIE WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ZĘBA KULTYWATORA Z WYKORZYSTANIEM METOD NUMERYCZNYCH

Radosław Patyk, Leon Kukielka

Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. Praca dotyczy komputerowego modelowania i symulacji zjawiska zużycia zmęczeniowego lekkiego, sprężynowego zęba kultywatora. Opracowano modele: fizyczny, matematyczny i komputerowy procesu zmęczenia. Do modelowania zastosowano przyrostowy, uaktualniony opis Lagrange'a oraz adekwatne miary przyrostów naprężeń i odkształceń. Symulacje komputerowe przeprowadzono w systemie ANSYS/Ls-Dyna. Wyniki symulacji komputerowych zweryfikowano eksperymentalnie

Słowa kluczowe: modelowanie, MES, metody numeryczne, wytrzymałość zmęczeniowa

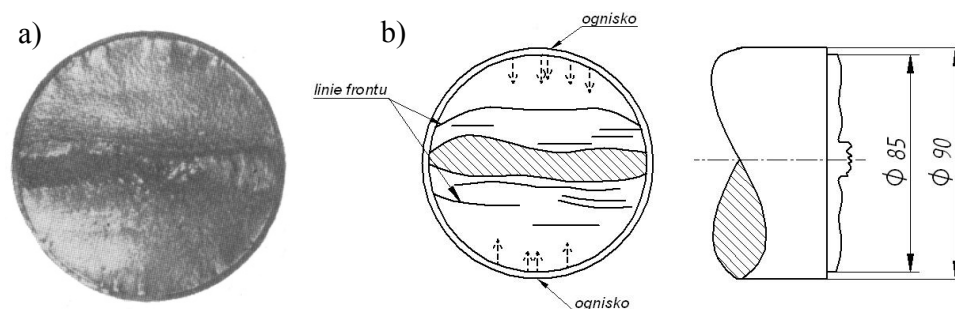
Wprowadzenie

Jedną z najczęściej spotykanych i zarazem najprostszych maszyn rolniczych jest kultywator. Maszyna ta narażona jest na duże obciążenia mechaniczne podczas pracy, a w szczególności jej części robocze czyli zęby. Zęby kultywatora muszą być odporne na wielokrotne zginanie. Pękanie zębów kultywatora jest spowodowane warunkami pracy, korozją oraz wadami fabrycznymi. Sprężyste zęby kultywatorów drgają silnie podczas pracy, co zwiększa intensywność ich oddziaływania na glebę i umożliwia wyciąganie na powierzchnię chwastów rozłogowych bez ich nadmiernego rozrywania, oraz kruszą i miesza glebę. Opór pojedynczych zębów kultywatora zawiera się w szerokim przedziale sił $F = 180 \div 550$ N, zależnie od rodzaju zastosowanej części roboczej – redliczki. Aby zapewnić prawidłową uprawę, agregaty z kultywátorem lekkim, pracują na głębokości $g = 5 \div 8$ cm i powinny poruszać się z prędkością powyżej $v \geq 9$ km·h⁻¹.

Zjawisko zmęczenia materiału

Zużycie zmęczeniowe jest rodzajem zużycia, w którym występuje miejscowa utrata spójności i związane z nią ubytki materiału spowodowane cyklicznym oddziaływaniem obciążeń nie przekraczających statycznych obciążeń krytycznych. Wyróżnia się dwa rodzaje zużycia zmęczeniowego: zużycie powierzchniowe oraz zużycie objętościowe [Hebda i Wahal 1980]. Zmęczeniowe zużycie powierzchniowe występuje w parach kinematycznych (np. w częściach silników spalinowych – popychacze zaworów, trzonki zaworów, tuleje cylindrowe, tłoki, koła zębate itp.), natomiast zużycie objętościowe (postaciowe) występuje w częściach obciążonych cyklicznym momentem gnącym i skręcającym (np.

wały korbowe, turbiny, czopy pod koła zębate, pasowe, łańcuchowe, sprężyste elementy robocze maszyn rolniczych, itp.). Przykład postaciowego złomu zmęczeniowego oraz schemat procesu pęknięcia wałka obciążonego cyklicznym momentem gnącym przedstawiono na rysunku 1. Pęknięcie zmęczeniowe wałka było spowodowane błędną konstrukcją, powodującą nadmierne spiętrzenie naprężeń w miejscu zmiany średnic wałka (wpływ karbu).



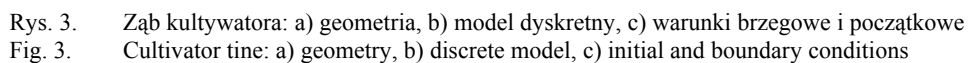
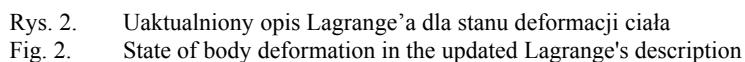
Rys. 1. Zjawisko zmęczenia postaciowego: a) przełom, b) schemat procesu pęknięcia

Fig. 1. Phenomenon of volumetrically fatigue: a) fracture, b) schema of cracking process

Odporność części na zużycie zmęczeniowe można zwiększyć dwoma sposobami: unikać wad powierzchniowych oraz wpływu karbów i mikrokarbów (w obróbkach wykończeniowych uzyskiwać wysokie gładkości powierzchni) oraz wprowadzając korzystny rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Praca dotyczy komputerowego modelowania i symulacji procesu cyklicznego zginania zęba kultywatora (lekkiego, sprężynowego) w celu prognozowania jego wytrzymałości zmęczeniowej.

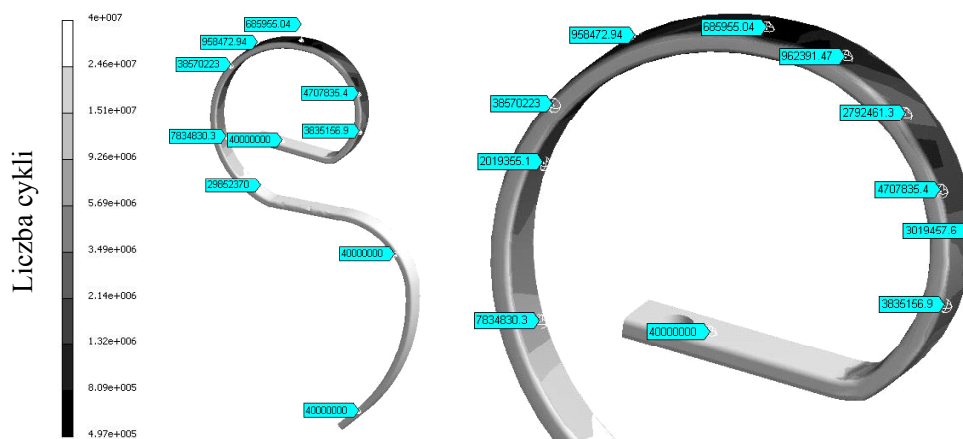
Model numeryczny procesu zmęczenia zęba kultywatora

Matematyczny opis zjawisk nieliniowych wymaga stosowania innych niż w zagadnieniach liniowych, zasad formułowania problemów brzegowo-początkowych i bardziej złożonych metod ich rozwiązywania. Współcześnie do analizy zjawisk nieliniowych stosuje się opis przyrostowy. Celem jest określenie geometrii ciała oraz istniejącego w tym ciele stanów przyrostu: przemieszczenia, odkształcenia, naprężeń itd., w kolejnych dyskretnych chwilach czasu $\tau = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$, odpowiadających pewnemu niewielkiemu przyrostowi czasu. Zakłada się, że znane są rozwiązania dla wszystkich kroków czasowych z przedziału $[0, t]$, poszukiwane zaś będą rozwiązania w chwili $t+\Delta t$. Powtarzając ten proces dla kolejnych chwil Δt uzyskuje się rozwiązanie w zadanym przedziale czasu. Szerokie omówienie zagadnień związanych z opisem przyrostowym zawierają prace Kleibera. W pracach tych dokonano analizy zastosowania istniejących koncepcji opisu przyrostowego w nieliniowej mechanice tj. ogólnego i uaktualnionego opisu Lagrange'a, do opisu deformacji ciała. Do opisu omawianego procesu eksploatacji zęba kultywatora przyjęto uaktualniony opis Lagrange'a (rys. 2), bazujący na założeniu addytywności poszczególnych składowych odkształcenia na konfiguracji pierwotnej lub aktualnej. Koncepcja uaktualnionego opisu Lagrange'a charakteryzuje się dużą uniwersalnością i może być wykorzystana do nieliniowej analizy procesów w ramach różnych teorii [Kleiber 2000].



Według PN-92/R-58051-1 za poprawnie wykonany ząb kultywatora uznaje się taki, który przy jednokrotnym napięciu sprężyny (jej końca) o wartość $z = 180$ mm, mierzonym w kierunku wymiaru $w = 90 \pm 10$ mm nie ulega pęknięciu. Obciążenie powinno być przyłożone w czasie $t = 5$ s, dla końca sprężyny na długości styku z redliczką dopuszczalne odchylenie kształtu powinno mieścić się w granicach ± 2 mm. Obliczono, że wartość siły niezbędna do wychylenia końca zęba kultywatora do wartości przewidzianej normą wynosi $F = 743$ N. W celu symulacji procesu odkształcania zęba kultywatora podczas pracy opracowano model komputerowy, który dyskretyzowano elementami typu Solid (zawierającym 8649 węzłów) (rys. 3b), w miejscu mocowania zęba kultywatora do ramy odebrano translacyjne i rotacyjne stopnie swobody, natomiast na koniec zęba przyłożono siłę $F = 497$ N powodującą jego wychylenie o $z = 120$ mm (rys. 3 c). Analizowany ząb kultywatora wykonany jest ze stali sprężynowej 51Si7 (50S2) przeznaczonej do ulepszania cieplnego. Dlatego w modelu komputerowym przyjęto sprężysty model materiałowy o następujących parametrach: moduł Younga $E = 200$ GPa i współczynnik Poissona $\nu = 0,3$.

Rozwiązanie równania ruchu przeprowadzono metodą całkowania niejawnego. Otrzymane wyniki rozkładu wytrzymałości zmęczeniowej (liczby cykli) dla poszczególnych obszarów zęba przedstawiono na rysunku 4.

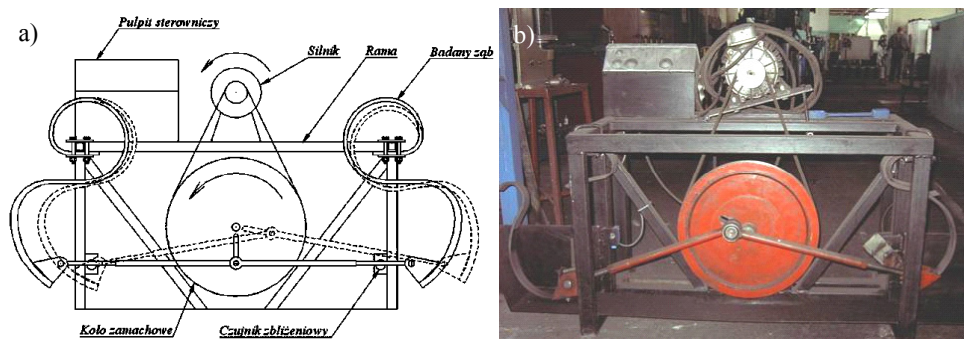


Rys. 4. Wyniki analizy numerycznej (wartość i rozkład wytrzymałości zmęczeniowej dla $\sigma = 498$ MPa)
Fig. 4. Results of numerical analysis (value and distribution of fatigue strength for $\sigma = 498$ MPa)

Badania eksperymentalne procesu zmęczenia zęba kultywatora

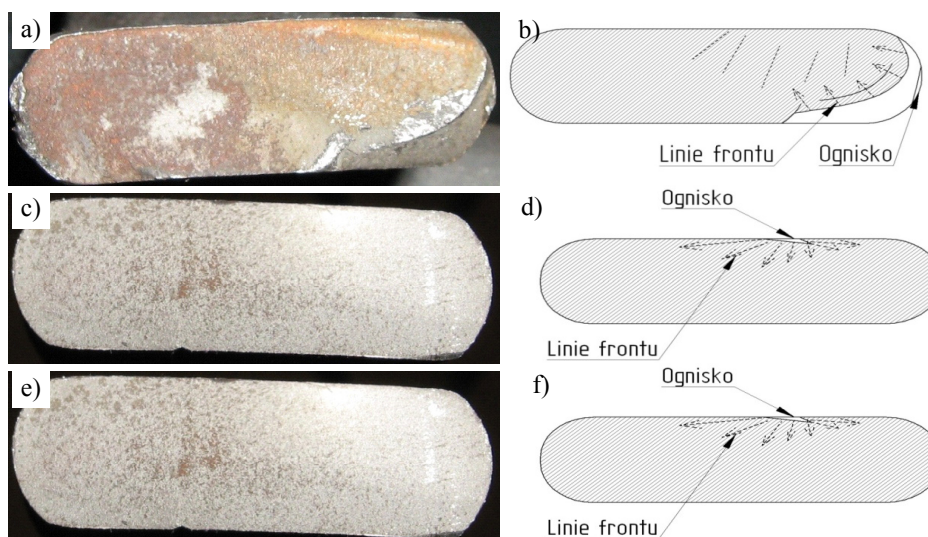
Schemat stanowiska do badania wytrzymałości zmęczeniowej zębów kultywatorów przedstawiono na rysunku 5a. Urządzenie (rys. 5b) składa się z silnika elektrycznego połączanego za pośrednictwem paska z kołem. Koło to, dzięki dużej średnicy pełni funkcję koła zamachowego a jednocześnie przekładni pasowej przenoszącej ruch obrotowy silnika na ruch posuwisto-zwrotny drążków popychaczy. Całość osadzona jest na ramie, na której znajdują się uchwyty do zamocowania zębów, które zostały tak zaprojektowane, aby ułożenie i badanie zębów przebiegało w sposób zbliżony do ich rzeczywistej pracy. Istnieje

możliwość zamontowania i badania dwóch zębów jednocześnie, a w przypadku pęknięcia jednego z nich układ zabezpieczający wyłączy urządzenie zapobiegając jego uszkodzeniu. Istnieje również możliwość regulacji długości drążków popychaczy, dzięki czemu można regulować ugięcie zębów, co jest związane z możliwością badania różnych typów zębów. Stanowisko badawcze wyposażono w czujniki zbliżeniowe i układ zliczający liczbę wychyleń badanych zębów. Przełożenia przekładni pasowej jest tak dobrane, aby uzyskać stałą liczbę $n = 4,333 \text{ cykl} \cdot \text{s}^{-1}$, gdzie jeden cykl odpowiada 2 odchyleniom zęba w przeciwną stronę o zadaną wartość. Na pulpicie sterowniczym znajdują się liczniki wychyleń poszczególnych badanych zębów wraz z przyciskami zerującymi liczniki oraz włącznik zasilania silnika.



Rys. 5. Stanowisko badawcze: a) schemat, b) widok ogólny
Fig. 5. Research state: a) schema, b) general view

Powierzchnia lekkiego sprężynowego zęba kultywatora posiadała chropowatość powierzchni mierzoną parametrem $R_z = 15 \mu\text{m}$ (wysokość nierówności według dziesięciu punktów profilu). Badania zmęczeniowe wykonywano w jednym pomieszczeniu i rozpoczynano je o tej samej porze dnia. Średnia temperatura podczas badań wynosiła 19°C . Wszystkie zęby mocowane były w ten sam sposób i przez tę samą osobę. Ugięcie zębów wynosiło $z = 120 \text{ mm}$, liczba cykli ugięć $n = 4,333 \text{ cykl} \cdot \text{s}^{-1}$. Na rysunku 6a oraz 6b przedstawiono pęknięcie, którego ognisko przesunięte jest w bok od osi pionowej zęba. Mogło to być spowodowane niesymetrycznym wygięciem zęba a w rezultacie spiętrzeniem naprężeń z jednej jego strony. Na rysunku 6c oraz 6d przedstawiono pęknięcie o małej strefie zniszczenia zmęczeniowego, prawdopodobnie wynikające z wady materiału lub wcześniejszemu uszkodzeniu warstwy wierzchniej. Na rysunku 6e oraz 6f przedstawiono pęknięcie o wyraźnie widocznej strefie zniszczenia zmęczeniowego. Wszystkie pęknięcia zębów wystąpiły w ich górnej części, gdzie wartości naprężeń były największe. Wyniki badań zestawiono w tabeli 1.



Rys. 6. Przykłady pęknięć zmęczeniowych oraz ich schematy a) i b) przesunięte ognisko, c) i d) mała strefa zużycia zmęczeniowego, e) i f) przełom zęba bez błędów mocowania i wad materiałowych

Fig. 6. Examples of fatigue cracks and their schemas a) and b) biased centre, c) and d) small zone of fatigue wear, e) and f) fracture of tine without mistakes fixing and material defect

Tabela 1. Zestawienie wyników badań zmęczeniowych

Table 1. The list of fatigue researches results

Numer zęba	Liczba cykli	Średnia liczba cykli
1	564900	468 660
2	374400	
3	374400	
4	592800	
5	436800	

Wnioski z badań

- Opracowany model komputerowy w programie ANSYS/LS-Dyna umożliwia symulację różnych zjawisk fizycznych występujących podczas pracy zęba kultywatora, przez co możliwe jest lepsze projektowanie i optymalizacja konstrukcji zęba kultywatora.
- Możliwe jest prognozowanie wytrzymałości zmęczeniowej zęba kultywatora metodami numerycznymi. Uzyskane wyniki średniej liczby cykli ugięcia zęba kultywatora uzyskane z obliczeń numerycznych ($\bar{n} = 497000$) i badań eksperymentalnych ($\bar{n} = 468660$) są zbliżone.

Bibliografia

Hebda M., Wahal A. 1980. Trybologia. WNT, Warszawa.

Kleiber M. 2000. Wykłady z nieliniowej termo–mechaniki ciał odkształcalnych. Politechnika Warszawska, Warszawa. Maszynopis.

PREDICTING CULTIVATOR TINE FATIGUE STRENGTH USING NUMERICAL METHODS

Abstract. The work concerns computer modelling and simulation of the effect involving fatigue wear of a lightweight, spring-actuated cultivator tine. The following fatigue process models were developed: physical, mathematical and computer. Incremental, updated Lagrange description and adequate measures of stress and strain increments were employed for modelling. Computer simulations were carried out in the ANSYS/Ls-Dyna system. Results of computer simulations were verified experimentally.

Key words: modelling, MES, numerical methods, fatigue strength

Adres do korespondencji:

Leon Kukiłka; e-mail: leon.kukielka@tu.koszalin.pl
Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów
Politechnika Koszalińska
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin