

## PROBLEMATYKA SZACOWANIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ W PROJEKTOWANIU MASZYN ROLNICZYCH NA PRZYKŁADZIE KOMBAJNU DO MELIORACJI ROWÓW\*

*Jan Szczepaniak, Mikołaj Spadło*  
*Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu*

**Streszczenie.** W artykule zawarto opis analizy zmęczeniowej wybranego przypadku eksploatacyjnego kombajnu melioracyjnego, przeprowadzonej w komputerowym środowisku symulacyjnym. Opisano techniki, którymi posłużono się w procesie predykcji trwałości zmęczeniowej, i uzasadniono wybór konkretnych metod. W wyniku opracowanej na potrzeby badań własnej procedury obliczeń zlokalizowano obszary, w których naprężenia przekraczają wartości dopuszczalne. Zaimplementowane w konstrukcji wzmocnienia pozwoliły na zaprojektowanie konstrukcji o wymaganej niezawodności.

**Słowa kluczowe:** analiza zmęczeniowa, obliczenia symulacyjne, trwałość eksploatacyjna, maszyny melioracyjne, rowy melioracyjne.

### Wprowadzenie

Projektowanie współczesnych maszyn roboczych, w tym rolniczych, jest procesem złożonym, wymagającym przeprowadzenia wielu symulacji komputerowych, pozwalających przewidywać zachowania obiektów technicznych w przyszłości. Ważną grupę stanowią badania wytrzymałościowe na modelach wirtualnych z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) prowadzone w zakresie statycznym, dynamicznym, zmęczeniowym, statecznościowym [Patyk i in. 2009]. Na podstawie wyników badań symulacyjnych można stwierdzić, czy przyjęta na etapie projektowania konstrukcja spełnia wymagania wytrzyma-

---

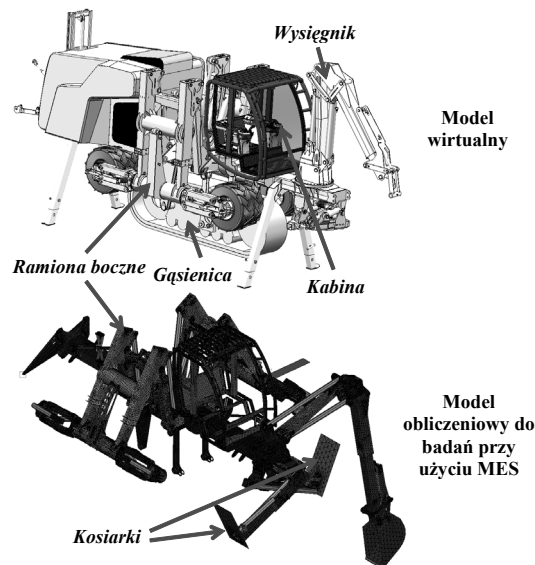
\* *Prace zrealizowano w ramach projektu badawczo-rozwojowego, pt.: „Technologia i nowej generacji urządzenie wielozadaniowe do regeneracyjnego kształtowania otwartych cieków wodnych”, nr WND-POIG.01.03.01-00-165/09, w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka na lata 2007-2013. Projekt dofinansowany jest ze środków unijnych w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego*

małościowe i odpowiedzieć na pytanie, czy wybrane węzły konstrukcyjne w roboczym przedziale obciążeń ulegną zniszczeniu lub zużyciu w założonym okresie eksploatacji.

Zagadnienie szacowania trwałości zmęczeniowej złożonych struktur, którymi niewątpliwie są maszyny rolnicze, przysparza wiele trudności. Występują tu problemy już w samym opisie obserwowanych zjawisk za pomocą modeli deterministycznych, które z reguły są nieskuteczne dla złożonych przypadków. Z kolei modele probabilistyczne dają lepsze wyniki, lecz są bardziej wymagające pod względem ilości informacji, jakich trzeba dostarczyć.

### Charakterystyka przedmiotu badań

Głównym przeznaczeniem wielozadaniowego urządzenia przedstawionego na rysunku 1 jest regeneracja rowów melioracyjnych realizowana poprzez koszenie skarpi i nadawanie im właściwego kształtu. Pojazd ma budowę modułową. Wyposażony jest w wysięgnik oraz opatentowany zespół zawieszenia narzędzi, poprzez które przeprowadzane są podstawowe operacje technologiczne. Odpowiednią trakcję w rowie zapewnia umieszczona centralnie gąsienica. Maszyna ma możliwość samodzielnego wstawiania się do rowu za pośrednictwem ramion bocznych. Główną ich funkcją jest jednak zabezpieczenie przed utratą stateczności w trakcie jazdy w rowie. Powstaje wówczas cykliczny stan wyężenia konstrukcji, który może wywoływać pęknięcia zmęczeniowe.



Źródło: badania własne

Rys. 1. Model wirtualny i dyskretny wielozadaniowego urządzenia do regeneracji otwartych cieków wodnych

Fig. 1. Virtual and discrete model of multi-role unit

### **Analizy zmęczeniowe prototypu kombajnu melioracyjnego**

Z analizami trwałościowymi kombajnu melioracyjnego wiązał się szereg problemów, z których trzy zasadnicze to:

- brak informacji o własnościach dynamicznych badanego obiektu,
- brak informacji o przebiegach naprężeń,
- wybór odpowiednich metod analizy zmęczeniowej dla analizowanego przypadku.

### **Procedura szacowania trwałości**

Przyjęto założenie, że konstrukcja powinna pracować w zakresie trwałej wytrzymałości zmęczeniowej, dla dowolnego poziomu naprężeń amplitudowych. Oznacza to, że dla ustalonego przebiegu obciążeń wartość naprężeń amplitudowych powinna być mniejsza od wartości trwałej wytrzymałości zmęczeniowej.

Pod względem technicznym analizy zmęczeniowe przeprowadzono według następującego schematu:

- badania symulacyjne na modelu bryłowym w celu określenia widma obciążeń,
- analiza dynamiczna w celu określenia widma naprężeń, wykonana przy użyciu MES na podstawie znajomości postaci i częstotliwości drgań własnych kombajnu i wygenerowanego przebiegu obciążeń,
- wybór kilku najbardziej obciążonych węzłów i przeprowadzenie redukcji przebiegu naprężeń do zbioru cykli sinusoidalnych metodą "Rainflow",
- ocena trwałości poprzez skonfrontowanie zakresu zmian naprężeń i naprężeń średnich na wykresie Goodmana-Smitha dla próbek rozciąganych i ściskanych.

Wykorzystanie analizy dynamicznej w tym zagadnieniu zdecydowanie zwiększa poziom realizmu analiz. Obok sztywności, uwzględnione zostają: inercja układu oraz zjawiska dyssypacyjne. Bazowanie na analizie statycznej, w której wyznacza się naprężenia przy założeniu braku wpływu bezwładności i tłumienia na poziom naprężeń, jest podejściem daleko upraszczającym analizy zmęczeniowe złożonej przestrzennej konstrukcji ramowej, jaką jest kombajn melioracyjny.

### **Określenie własności dynamicznych obiektu**

Dla dyskretnego, liniowego modelu MES analizowanego modelu urządzenia znana jest tylko macierz mas  $M$  i macierz sztywności  $K$ . Wielkości te wynikają wprost z topologii konstrukcji oraz przyjętych stałych: modułu Younga  $E$ , współczynnika Poissona  $\nu$  i gęstości  $\rho$ . Brakuje natomiast danych dotyczących macierzy tłumienia  $C$ . Dla złożonych konstrukcji jej wyznaczenie wymaga przeprowadzenia doświadczeń z wykorzystaniem rzeczywistego obiektu. W przypadku kombajnu melioracyjnego nie było to niestety możliwe i wymagane było przyjęcie stosownych uproszczeń.

Ogólnie w zagadnieniach predykcji trwałości można wyszczególnić trzy rodzaje tłumienia: materiałowe, konstrukcyjne i zewnętrzne. Pierwsze wynika ze zjawisk, jakie zachodzą w skali mikro w samym materiale. Scharakteryzować je można poprzez przypisanie materiałowi logarytmicznego dekrementu tłumienia. Na potrzeby analiz ustalono dla stali konstrukcyjnej  $\delta = 0,01$  [Bachmann i in. 1997]. Drugi rodzaj tłumienia zależny jest między innymi od rodzaju zastosowanych połączeń, występujących luzów oraz od obecności ele-

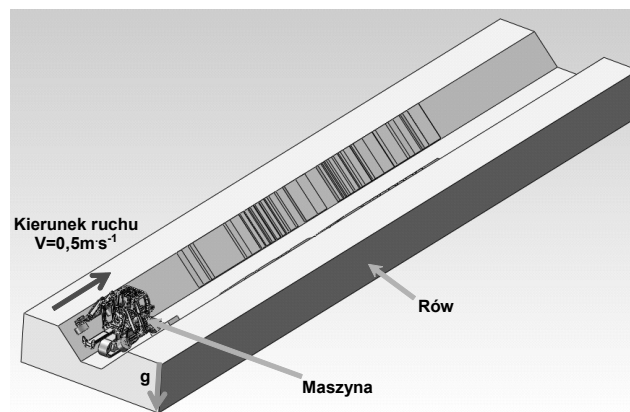
mentów takich, jak siłowniki. W analizowanym przypadku tłumienie konstrukcyjne pominięto z uwagi na złożoność modelu (ok. 800000 elementów) oraz ze względu na nieliniowości, które charakteryzują ten typ tłumienia i związaną z tym trudność w modelowaniu (potrzebna duża moc obliczeniowa). Na trzeci rodzaj ma wpływ otoczenie konstrukcji. Ten rodzaj tłumienia uwzględniono na etapie generowania widma obciążeń.

### Generowanie widm obciążeń

Widma obciążeń, oddziaływujących na konstrukcję, mogą być generowane w dwojaki sposób, tj. z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego albo metodami symulacji komputerowych. Pierwszy sposób zapewnia poprawne odzwierciedlenie zachowań dynamicznych konstrukcji (np. pary kontaktowej koło-grunt) w warunkach, w których badane urządzenie będzie w przyszłości funkcjonować. Wymagany jest przy tym model fizyczny w postaci prototypu lub też maszyny o zbliżonej konstrukcji.

W środowisku symulacyjnym widmo obciążeń dla potrzeb szacowania trwałości zmęczeniowej generowane jest na modelu wirtualnym. O stopniu zgodności uzyskanych wyników w odniesieniu do przebiegów obciążeń, pochodzących z badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistych, decyduje między innymi stopień złożoności modelu oraz przyjęte warunki brzegowe.

Dla potrzeb wyznaczenia widma obciążeń wielozadaniowego urządzenia do regeneracji otwartych cieków wodnych, prowadzono badania na modelu bryłowym (rys. 2), który składał się z wirtualnego modelu rowu i maszyny. Obciążenia pochodziły tu od sił grawitacji. Do stopy gaśienicy przyłożono napęd i ustalono prędkość liniową jej przemieszczania wynoszącą  $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

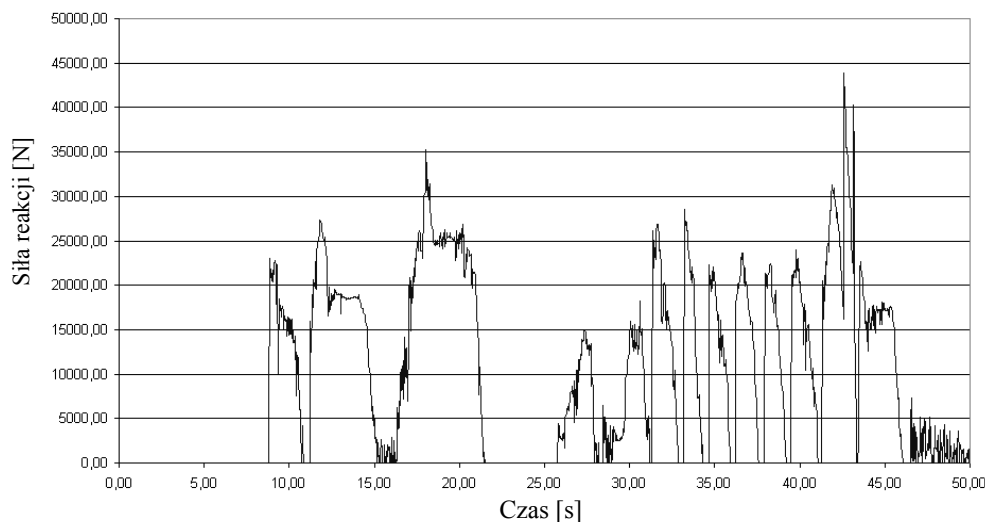


Źródło: badania własne

Rys. 2. Model obliczeniowy składający się z rowu i urządzenia przemieszczającego się z prędkością  $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 2. Computational model consisting of a ditch and a machine moving at the speed  $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Wielkości opisujące parametry dynamiczne modelu (sztywność i tłumienie par kontaktowych koło-grunt, kosiarki-grunt, gąsienica-grunt) określono na podstawie znajomości nośności podłoża. Badania symulacyjne polegały na rejestrowaniu reakcji pomiędzy kołami bocznymi, gąsienicą, kosiarkami a gruntem (rys. 3).



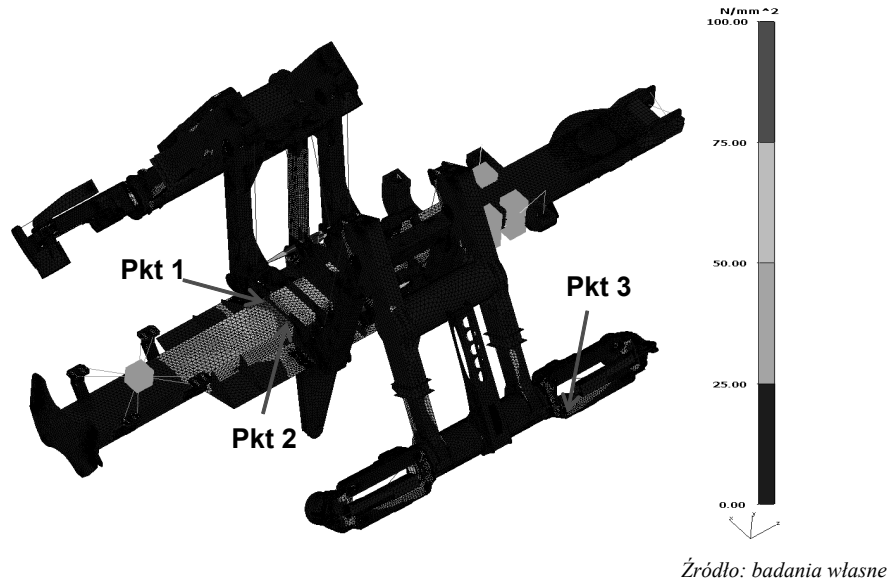
Źródło: badania własne

Rys. 3. Przebieg reakcji podłoża na koło boczne, przednie, lewe w funkcji czasu  
Fig. 3. The ground reaction value on the front left side wheel in time

### Wybór metod analizy zmęczeniowej i obliczenia dla wybranego przypadku

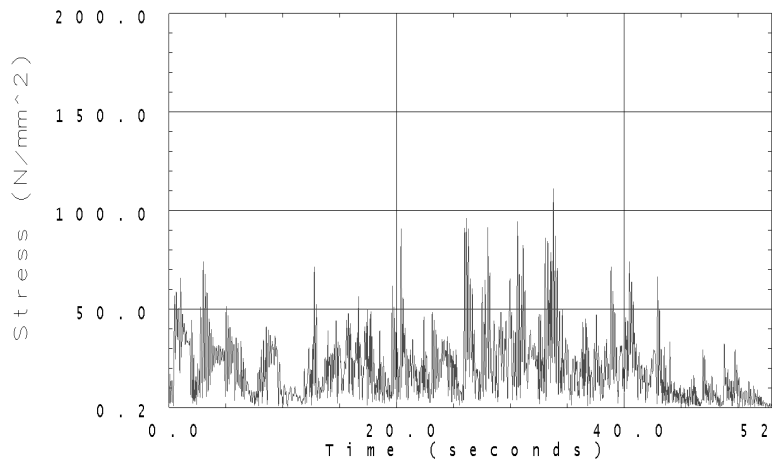
Wykresy przedstawiające zmiany wymuszeń w czasie są podstawą do przeprowadzenia badań trwałościowych. Pozwalają one na realizację analiz dynamicznych z wykorzystaniem modelu obliczeniowego wykonanego za pomocą MES i wygenerowanie map naprężeń zredukowanych według Hubera-Misesa-Hencky'ego dla dowolnego kroku czasowego  $t$ . W analizowanym przypadku zlokalizowano 3 niebezpieczne punkty (rys. 4).

Przebieg funkcji dla naprężeń w punkcie 1 przedstawiono na rys. 5. W takiej postaci przebieg naprężeń jest mało przydatny do szacowania trwałości. Konieczne jest dokonanie filtracji "historii obciążeń" w celu stwierdzenia, które składowe widma obciążeń mają wpływ na trwałość, a jakie z tego punktu widzenia są neutralne. Obecnie najpopularniejszą techniką jest metoda spadającej kropli ("Rainflow") [Kocańda 1997]. W wyniku jej użycia otrzymuje się zbiór cykli (i półcykli) sinusoidalnych, istotnych z punktu widzenia zmęczenia, zawierający informacje o amplitudzie i wartości średniej naprężeń oraz o liczbie cykli. Efekt redukcji przebiegu funkcji rozkładu naprężeń w czasie z rysunku 5 przedstawiono na rys. 6 i w tabeli 1.



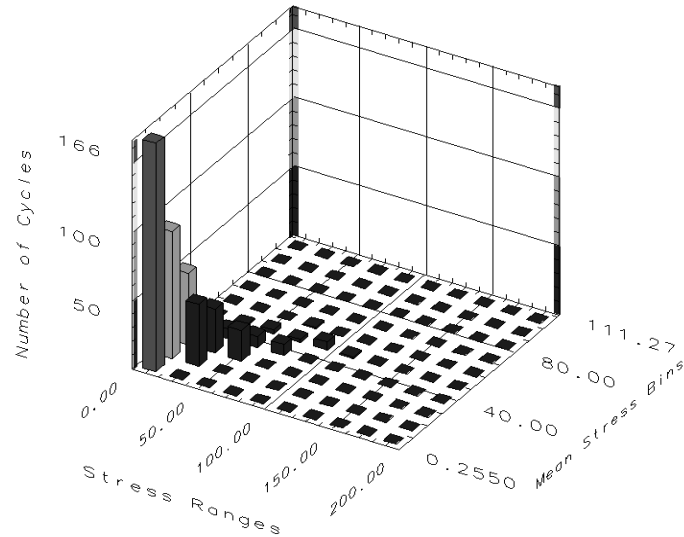
Rys. 4. Mapa naprężeń zredukowanych H-M-H w kroku czasowym 25,4 s – ruch na wprost z prędkością  $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 4. H-M-H reduced stress map in time step 25,4 s – moving straight at the speed  $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Rys. 5. Wykres naprężeń zredukowanych H-M-H w punkcie 1 – ruch na wprost z prędkością  $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 5. Graph of the reduced H-M-H stresses in point 1 – moving straight at the speed  $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Źródło: badania własne

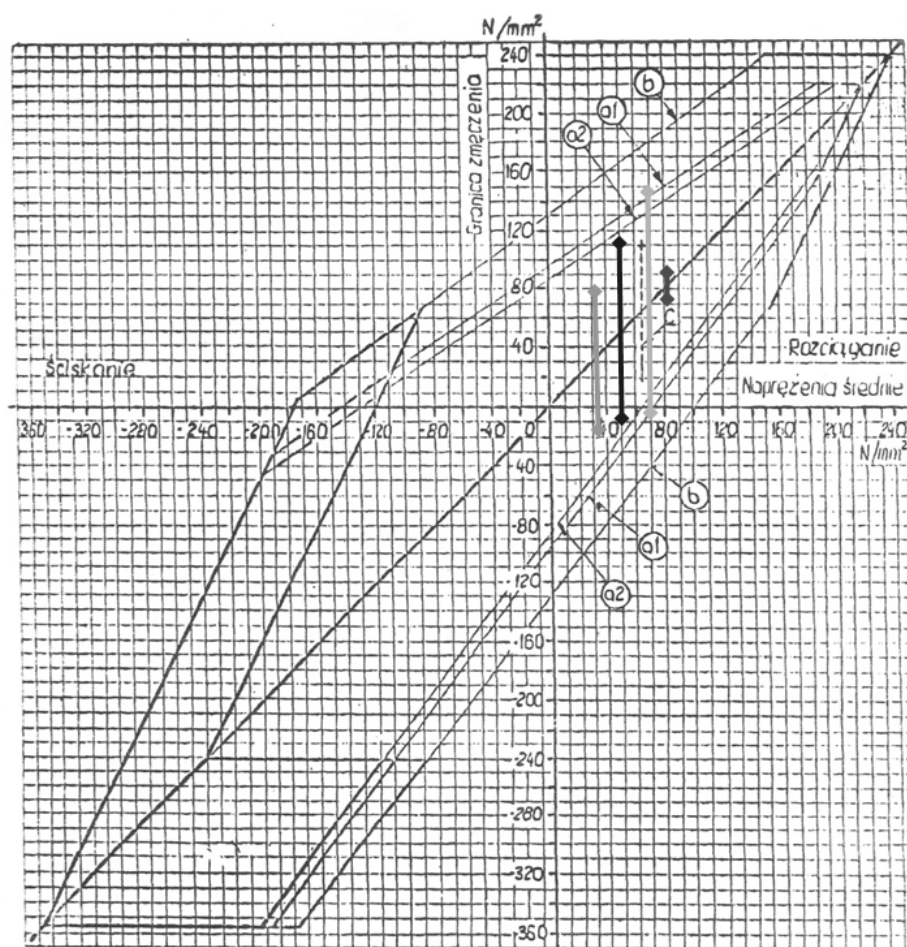
Rys. 6. Efekt redukcji zmian naprężeń w punkcie 1 metodą "Rainflow"  
 Fig. 6. Effect of stresses reduction in point 1 by Rainflow method

Tabela 1. Zestawienie naprężeń średnich, zakresu zmian naprężeń oraz liczby cykli w punkcie 1  
 Table 1. The list of average stresses, the stresses range and the number of cycles in point 1

RANGES	MEAN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.0	16.5	33.0	49.5	66.0	82.6	99.1	115.6	132.1	148.6
	16.5	33.0	49.5	66.0	82.6	99.1	115.6	132.1	148.6	165.1
1 20	31	133	4	2	0	0	0	0	0	0
2 40	1	54	3	0	0	0	0	0	0	0
3 60	0	13	5	0	0	0	0	0	0	0
4 80	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0
5 100	0	0	3	2	1	0	0	0	0	0
6 120	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0
7 140	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8 160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 180	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10 200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Jako kryterium wpływu wielowymiarowości tensora naprężeń na stan wytężenia wybrano hipotezę energii właściwej odkształcenia postaciowego, pomimo że w aspekcie szacowania trwałości zmęczeniowej ma ona obecnie znaczenie historyczne. Zgodnie z [Karolczuk 2003], próby zaadaptowania przez badaczy statycznych hipotez wytężenia materiału okazały się bardzo ograniczone w zastosowaniach i nie spełniły oczekiwań. Dla zdecydowanej większości analizowanych materiałów i obciążeń nie udało się zadawalająco skorelować procesów zmęczeniowych z parametrami występującymi w tych hipotezach. Według Mrzygłóda [2003] duże praktyczne znaczenie ma hipoteza Dang-Vana, która oparta jest na założeniu, że w trakcie pracy konstrukcji w zakresie wytrzymałości wysoko-

cyklowej może lokalnie występować przekroczenie granicy plastyczności. Hipoteza ta jest uznawana za porównawczą dla nowych hipotez. Stąd jedynym uzasadnieniem wyboru hipotezy H-M-H jest dominacja jednego typu naprężeń. Z badań eksperymentalnych wykonanych przez pracowników Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych w Poznaniu wynika, że w przypadku konstrukcji rolniczych, które w istocie są ramami przestrzennymi, przeważają naprężenia jednego typu i określonego znaku (najczęściej wywołane zginaniem – rozciąganie lub ściskanie półek profili nośnych) – pozostałe naprężenia stanowią ok. 5–10%.



Źródło: badania własne

Rys. 7. Wykres Goodmana-Smitha dla stali S355, z naniesionymi wybranymi naprężeniami średnimi i amplitudowymi wyznaczonymi w punkcie pomiarowym 1

Fig. 7. Goodman-Smith graph for S355 steel, graphical presentation of effect for cases of loads in point 1



Dla przyjętych założeń głównym składnikiem wyznaczonych naprężeń zredukowanych H-M-H są naprężenia dominujące. Fakt ten znacznie przyspiesza prace, gdyż nie ma potrzeby obserwacji wszystkich składowych tensora płaskiego stanu naprężenia dla wybranego punktu w celu poszukiwania naprężeń, które przeważają. Poza tym naprężenia zredukowane mają zawsze znak dodatni. Jeżeli więc naprężenia dominujące mają znak ujemny (ściskanie), to na wykresie Goodmana-Smitha nanoszone są na dodatniej ćwiartce (rozciąganie). Zabieg ten zwiększa pewność obliczeń, ponieważ wytrzymałość zmęczeniowa stali w zakresie ściskania jest większa od wytrzymałości w zakresie rozciągania. Na rysunku 7 przedstawiono wykres Goodmana-Smitha z naniesionymi naprężeniami (użyte kolory korespondują z oznaczeniami na rysunku 6).

Wykorzystanie metody elementów skończonych w zakresie określania trwałości zmęczeniowej ma swoje oczywiste zalety. Dostarcza ona informacji o wpływie zastosowanego obciążenia na powstający stan naprężeń dla bardzo złożonych struktur. Niestety w aspekcie szacowania trwałości technika ta ma również wady. Przede wszystkim w "idealnym" modelu pomija się obecność pęknięć i zarysowań oraz nieliniowości związanych ze zmianami, jakie zachodzą w materiale, np. na skutek obróbki cieplnej lub nakładania spoin. Defekty te są jednak istotnym czynnikiem wpływającym na trwałość zmęczeniową. W omawianym przypadku pominięto więc wpływ wielkości przedmiotu, rodzaju obróbki cieplnej, stanu warstwy wierzchniej i korozji na wytrzymałość zmęczeniową. W analizach nie uwzględniono również wpływu współczynnika wrażliwości materiału na działanie karbu. Uwzględniono natomiast wpływ spawania przez obniżenie granicy wytrzymałości (krzywe  $a_1$  i  $a_2$  na rysunku 7).

## Podsumowanie

Wielozadaniowe urządzenie do regeneracji otwartych cieków wodnych jest przykładem maszyny, dla której wymagane było opracowanie rozwiązań konstrukcyjnych, zapewniających dużą niezawodność. Dlatego też, obok analiz w zakresie statycznym i wybocheniowym, wykonano szereg analiz zmęczeniowych. W tym celu opracowano własną procedurę szacowania trwałości, w której zawarto:

- badania symulacyjne pojazdu na modelu bryłowym w zakresie zachowań dynamicznych,
- badania z zastosowaniem MES w zakresie wygenerowania odpowiedzi struktury na zidentyfikowane widmo wymuszeń,
- obliczenia zmęczeniowe z wykorzystaniem wybranych metod.

W analizowanym przypadku naprężenia amplitudowe dla pierwszego punktu odczytu naprężeń nieznacznie przekraczają zakres trwałej wytrzymałości zmęczeniowej dla połączeń spawanych (rys. 7). Dzięki przedstawionym badaniom możliwe było zlokalizowanie i wzmocnienie obszaru (poprzez zwiększenie grubości blach z 8 mm do 10 mm), co spowodowało podniesie trwałości zmęczeniowej konstrukcji.

Należy mieć na uwadze fakt, że maszyna pracować będzie w nietypowych warunkach (jazda po podłożu o małej nośności i nieregularnym kształcie). W celu uzyskania większej pewności wnioskowania na temat trwałości zmęczeniowej należy wykonać badania weryfikacyjne na obiekcie rzeczywistym z zastosowaniem metod i aparatury pomiarowej. Eksperymenty te są przewidziane do realizacji w kolejnych etapach prac.

## Bibliografia

- Kocańda S., Szala J.** (1997): Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, ISBN 83-01-12259-5.
- Patyk R., Kukielka L.** (2009): Prognozowanie wytrzymałości zmęczeniowej zęba kultywatora z wykorzystaniem metod numerycznych. Inżynieria Rolnicza, 9(118).
- Szulej J.** (2010): Wyznaczenie ekwiwalentnego wiskotycznego tłumienia drgań w konstrukcjach wielomateriałowych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, ISBN 978-83-62596-00-3.
- Szczepaniak J.** (2008): Symulacja zachowań dynamicznych maszyn rolniczych z uwzględnieniem kryterium stateczności dla potrzeb bezpieczeństwa ruchu. Rozprawa habilitacyjna nr 28, Inżynieria Rolnicza, 8(106), ISSN 1429-7264.
- Szczepaniak J.** (2010): Narzędzia wspomagające proces przygotowania produkcji maszyn rolniczych Poznań. Technika Rolnicza Ogrodnicza i Leśna, 1, 8-12.
- Karolczuk A.** (2003): Płaszczyzny krytyczne w modelach zmęczenia materiałów przy wieloosiowych obciążeniach losowych. Rozprawa doktorska, Wydział Mechaniczny Politechniki Opolskiej, Opole. (on-line), [dostęp 30-10-2012]. Dostępny w Internecie: [http://a.karolczuk.po.opole.pl/Rozprawa\\_1\\_2.pdf](http://a.karolczuk.po.opole.pl/Rozprawa_1_2.pdf).
- Mrzyglód M.** (2005): Parametryczna optymalizacja konstrukcji pracujących przy obciążeniach wysokocyklowych. Rozprawa doktorska, Repozytorium Politechniki Krakowskiej, Kraków. (on-line), [dostęp 11-10-2012]. Dostępny w Internecie: [http://a.karolczuk.po.opole.pl/Rozprawa\\_1\\_2.pdf](http://a.karolczuk.po.opole.pl/Rozprawa_1_2.pdf).

## THE ISSUE OF FATIGUE EVALUATION OF AGRICULTURAL MACHINES SHOWN IN A MULTI-ROLE UNIT

**Abstract.** The article presents an overview of the fatigue analysis of a multi-role unit, carried out in a computer simulation environment. The techniques which were used in the prediction of durability were described. The author's own procedure for fatigue calculation of a multi-role unit was developed. By that means areas where stresses exceed the limit values were found. It allows implementing changes in the structure so the structure is designed with the required reliability.

**Key words:** fatigue analysis, simulation calculations, operational durability, drainage machines, drainage ditches

### Adres do korespondencji:

Jan Szczepaniak; e-mail: [jane@pimr.poznan.pl](mailto:jane@pimr.poznan.pl)  
Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu  
ul. Starołęcka 31  
60-963 Poznań