

Symulacja wpływu nagniatania na ewolucję naprężeń i trwałość zmęczeniową elementu z warstwą wierzchnią

GRZEGORZ STARZYŃSKI
STANISŁAW KUCHARSKI

Wytwarzanie technologicznej warstwy wierzchniej (TWW) na odpowiedzialnych częściach maszyn stało się w ostatnich latach tak popularne, że nie trzeba chyba nikogo przekonywać, że jest to zabieg potrzebny i opłacalny. W większości przypadków inicjacja zniszczenia zaczyna się właśnie na lub przy powierzchni badanych elementów.

Jednym z założeń upraszczających, które ciągle obowiązuje w obliczeniach wytrzymałościowych elementów maszyn, jest założenie o jednorodności materiału. Abstrahując od oczywistego faktu, że materiał jest niejednorodny w skali mikroskopowej, w obliczeniach elementów maszyn na ogół nie uwzględnia się niejednorodności występujących w skali makro, do których zaliczyć można *technologiczną warstwę wierzchnią* (TWW). Uwzględnienie przy projektowaniu elementów maszyn niejednorodności typu TWW implikuje potrzebę wyznaczenia naprężeń w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych, które mogą występować w wybranych strefach warstwy.

Korzystny wpływ zastosowania danej technologii do podwyższenia trwałości zmęczeniowej zależy nie tylko od jej parametrów, lecz także od geometrii elementu, na którym powstaje warstwa i od sposobu obciążania danego elementu. Dlatego też niezbędne jest prowadzenie zakrojonych na szeroką skalę badań przydatności danej technologii do zadanych obciążeń elementu. Badania takie są bardzo kosztowne, czasochłonne i pracochłonne.

Innym rozwiązaniem jest symulacja komputerowa procesu obciążania elementu z warstwą wierzchnią.

W trakcie badań teoretycznych nad tym problemem sformułowano układ równań, w którym niewiadomymi są przyrosty składowych naprężeń, a wektor prawej strony stanowi przyrost kąta skręcenia lub odkształceń osiowych, w zależności od rodzaju obciążenia. Opracowano również program komputerowy, który umożliwia rozwiązanie tego układu i w prosty sposób pozwala dokonać symulacji procesu monotonicznego i cyklicznego rozciągania lub skręcania elementu walcowego z warstwą wierzchnią

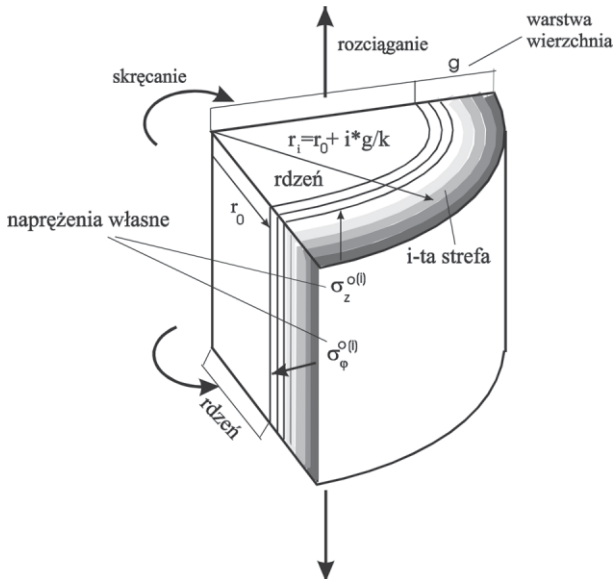
dla dowolnej konfiguracji własności materiałowych i naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Otrzymano rozkład i ewolucje składowych naprężeń po obciążeniu i odciążeniu w poszczególnych cyklach i w stanie ustalonym oraz ocenę trwałości zmęczeniowej po wprowadzeniu kryteriów zmęczeniowych. W artykule zasygnalizujemy jedynie podstawy, na jakich oparliśmy się przy rozwiązywaniu tego problemu, a omówimy wyniki i ich interpretację. Cała praca opiera się na badaniach symulacyjnych. Niekiedy będzie używane słowo „próbka”, ale ma ono znaczenie czysto formalne, nie dotyczy fizycznej próbki, a jedynie pewnego układu danych opisujących taką próbkę.

Prawidłowy opis elementu z warstwą wierzchnią, a w szczególności samej niejednorodnej warstwy, powinien uwzględniać możliwości zmian poszczególnych parametrów materiałowych warstwy w funkcji odległości od powierzchni próbki. Zmiany te cechują się na ogół gradientem własności materiałowych i naprężeń własnych w obszarze warstwy wierzchniej, co w obliczeniach analitycznych nie jest możliwe do uwzględnienia. Aby móc rozwiązać problem rozciągania czy skręcania w warstwie, proponujemy model polegający na zastąpieniu ciągłej zmiany własności materiałowych w obszarze warstwy przebiegiem *zdyskretyzowanym*. Polega on na tym, że element walcowy z warstwą wierzchnią modelowany jest za pomocą jednorodnego walca i pewnej liczby cienkościennych, współosiowych powłok z uwzględnieniem ich wzajemnego oddziaływania. Rozpatrywany element to walec o długości l ograniczony dwoma przekrojami poprzecznymi, prostopadłymi do osi. Obciążenie skręcające jest wymuszane poprzez wzajemny, sztywny obrót przekrojów poprzecznych. Rozciąganie jest opisywane przez odkształcenie osiowe z zachowaniem płaskości przekrojów poprzecznych. Powierzchnia walca nie podlega żadnym oddziaływaniom zewnętrznym. Wzdłuż długości walca nie zmieniają się własności materiałowe. Stan naprężeń w takim elemencie można ogólnie opisać, wykorzystując 4 składowe tensora naprężenia $\sigma_{\varphi^i}, \sigma_{r^i}, \sigma_{z^i}, \sigma_{z\varphi^i}$, gdyż pozostałe dwie składowe, t.j. $\sigma_{r\varphi^i}, \sigma_{rz}$ są równe zeru. Przyjmujemy, że w elemencie może występować stan własny naprężeń, tzn. że w warstwie wierzchniej istnieją niezerowe składowe $\sigma_{\varphi^0}, \sigma_z^0$ naprężeń początkowych. Naprężenia te mają często duże wartości wynikające z obróbki technologicznej. Stan naprężeń w rdzeniu wynika ze zrównoważenia naprężeń własnych w warstwie i wartości poszczególnych składowych tych naprężeń w rdzeniu są zwykle o rząd lub dwa rzędy wielkości niższe niż w warstwie. Mimo że

Dr Grzegorz Starzyński i dr hab. Stanisław Kucharski są pracownikami Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.

symulowane przez nas obciążenia walca z warstwą wierzchnią są jednoosiowe (rozciąganie lub skrócenie), to obliczenia naprężeń po obciążeniu wymagają uwzględnienia wieloosiowego stanu naprężenia w warstwie wierzchniej.

Przyjmijmy, że rozpatrywany element składa się z jednorodnego walca otoczonego k cienkościennymi powłokami (strefami) tworzącymi warstwę wierzchnią (rys. 1). Każda strefa warstwy może mieć inne własności materiałowe i naprężenia własne. Zakładamy



Rys. 1. Wycinek walca z warstwą wierzchnią podzieloną na strefy

jednak, że są one stałe na przekroju danej strefy. Liczba stref, na które została podzielona warstwa wierzchnia, zależy od żądanej dokładności aproksymacji gradientu zmian własności w warstwie wierzchniej.

Takie rozwiązanie dla procesu rozciągania zostało dokładnie opisane przez Mroza i Starzyńskiego [1], a dla skrócenia przez Kucharskiego [2] i Starzyńskiego [3].

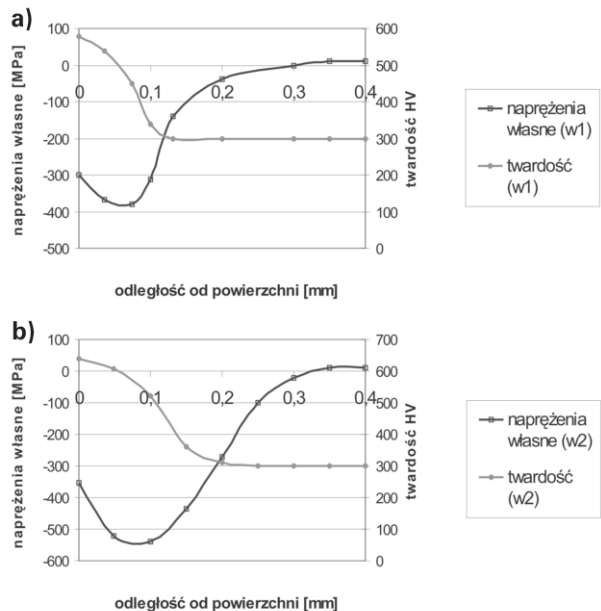
Ewolucja naprężeń w warstwach nagniatanych

Modelowanie własności warstwy nagniatanej

Do symulacji cyklicznego obciążenia wykorzystaliśmy bardzo dobrze opisaną w literaturze stal A516 [4]. Własności sprężyste, monotoniczne i cykliczne przedstawione są w tab. Inne dane niezbędne do symulacji obciążenia cyklicznego walca z warstwą wierzchnią, takie jak naprężenia własne i zmiany twardości po nagniataniu, również zaczerpnięto z literatury [5].

Zmiany naprężeń własnych i twardości dla stali nagniatanej przedstawiono na rys. 2. Trzeba zauważyć, że mierzalne zmiany twardości, które można traktować jako pewną miarę zgniotu (deformacji

materiału), a co się z tym łączy, także granicy plastyczności w warstwie wierzchniej, kończą się wcześniej niż zmiany naprężeń własnych. Modelowanie nagniatania przeprowadzono niezależnie dla dwóch warstw oznaczonych symbolami $w1$ i $w2$. Warstwa pierwsza ($w1$) charakteryzuje się naprężeniami własnymi o mniejszych wartościach bezwzględnych (rys. 2a) i mniejszą zmianą twardości, co odpowiada nagniataniu o mniejszej intensywności. Warstwa druga ($w2$) charakteryzuje się naprężeniami własnymi o większych wartościach bezwzględnych oraz silniej podniesioną twardością, a technologicznie odpowiada to nagniataniu o większej intensywności (rys. 2).



Rys. 2. Rozkład twardości i naprężeń własnych po nagniataniu w modelowej warstwie: a) $w1$, b) $w2$

Tak więc symulacja cyklicznego obciążenia dotyczyć będzie „próbki” z warstwą lekko nagniataną ($w1$), silnie nagniataną ($w2$), a także „próbki” jednorodnej, wykorzystanej do porównania trwałości zmęczenia próbki z warstwami i bez warstw. Wymiary „próbki” walcowej poddanej obciążeniu w programie komputerowym: promień $R = 2,5$ mm, grubość warstwy $w1: g_1 = 0,15$ mm, grubość warstwy $w2: g_2 = 0,2$ mm.

Wyniki symulacji ewolucji naprężeń

Pętle histerezy

Badania symulacyjne prowadzone były oddzielnie dla procesu rozciągania-ściskania dla kilku zadanych amplitud odkształcenia i podobnie dla skrócenia dla różnych kątów skrócenia. Obciążenia cykliczne zadawane były w programie do czasu pojawienia się ustabilizowanej pętli histerezy we współrzędnych $\sigma-\epsilon$ dla rozciągania lub $\tau-\theta$ dla skrócenia. Dwa przykłady

Własności monotoniczne i cykliczne stali A516

| Stal | Własności sprężyste | | Własności monotoniczne | | Własności cykliczne | |
|------|---------------------|-------|------------------------|-------------|---------------------|-------|
| | E , GPa | ν | R_e , MPa | R_m , MPa | k' , MPa | n' |
| A516 | 204 | 0,27 | 340 | 540 | 1067 | 0,193 |

Rys. 3. Ustabilizowane pętle histerezy naprężeń osiowych po rozciąganiu cyklicznym: a) amplituda odkształcenia $\varepsilon = 0,0025$; b) amplituda odkształcenia $\varepsilon = 0,01$

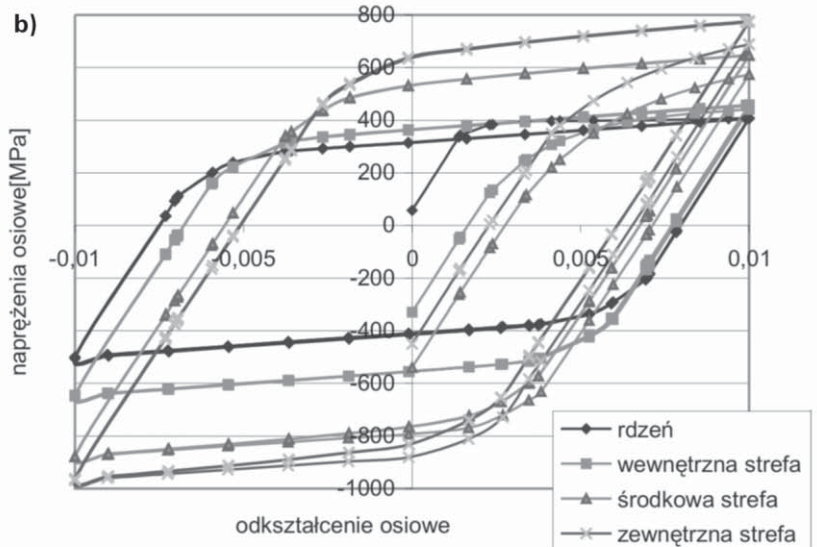
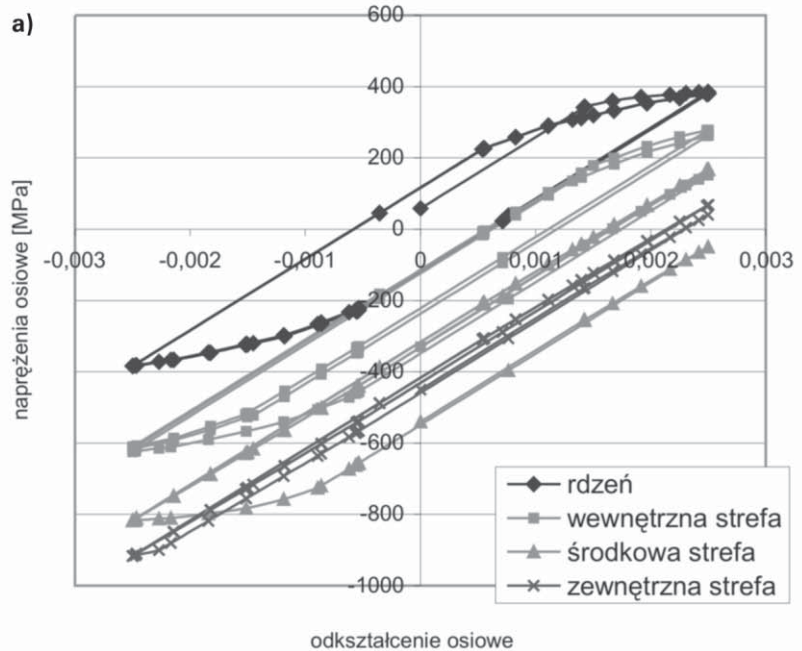
takich pętli dla wszystkich stref warstw i rdzenia są pokazane na rys. 3a (mała amplituda) i rys. 3b (duża amplituda odkształcenia). Widać znaczne zmiany nie tylko w wielkości pętli, co jest oczywiste, lecz także w położeniu środków pętli. Przy dużych odkształceniach środki pętli są blisko siebie i oscylują wokół zera, co wskazuje na silną relaksację naprężeń własnych.

● **Naprężenia własne w warstwie nagniatanej**

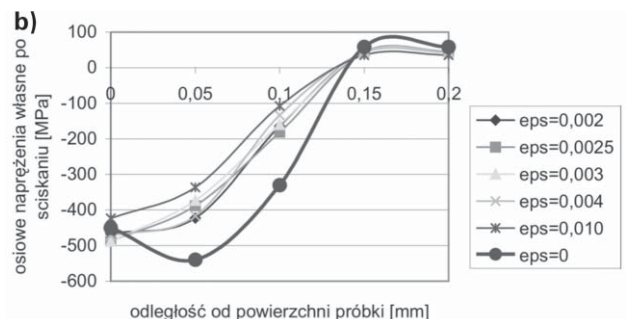
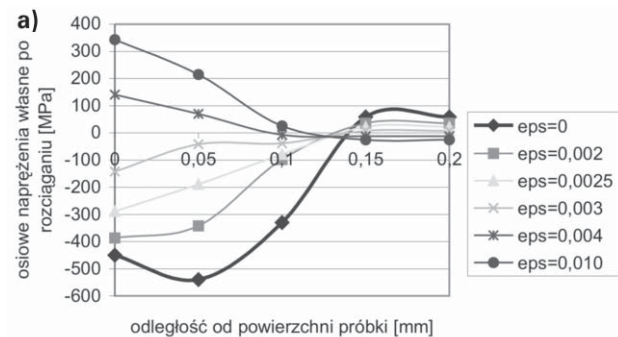
Kolejne rysunki przedstawiają dokładnie przebieg ewolucji naprężeń własnych dla różnych wartości zadawanych odkształceń cyklicznych w symulacji próby rozciągania-ściskania (rys. 4a, b) oraz skręcania (rys. 5 a, b) dla walca z warstwą wierzchnią typu w2. Wartości naprężeń na wykresach otrzymane zostały dla stanu ustabilizowanego, jako zależność składowej osiowej naprężeń własnych (po odciążeniu próbki) od odległości od powierzchni próbki w obszarze warstwy nagniatanej. Krzywa $\text{eps} = 0$ oznacza przebieg naprężeń własnych przed obciążeniem cyklicznym, czyli naprężeń technologicznych. Kolejne krzywe dla zwiększających się wartości odkształceń (eps) przedstawiają zmiany naprężeń własnych.

Wykresy 4a i 4b ilustrują zmiany, jakie zachodzą w rozkładzie naprężeń własnych w warstwie dla dwóch przypadków: gdy odciążenie próbki nastąpi w półcyklu poprzedzonym rozciąganiem (a) lub ściskaniem (b) próbki. Różnice są bardzo wyraźne. W pierwszym przypadku następuje silna relaksacja naprężeń związana ze znacznie większym uplastycznieniem rdzenia w stosunku do warstwy, które wynika właśnie z istnienia naprężeń ściskających.

Naprężenia te początkowo relaksują do zera, aby później zmienić znak na dodatni (rys. 4a). W drugim



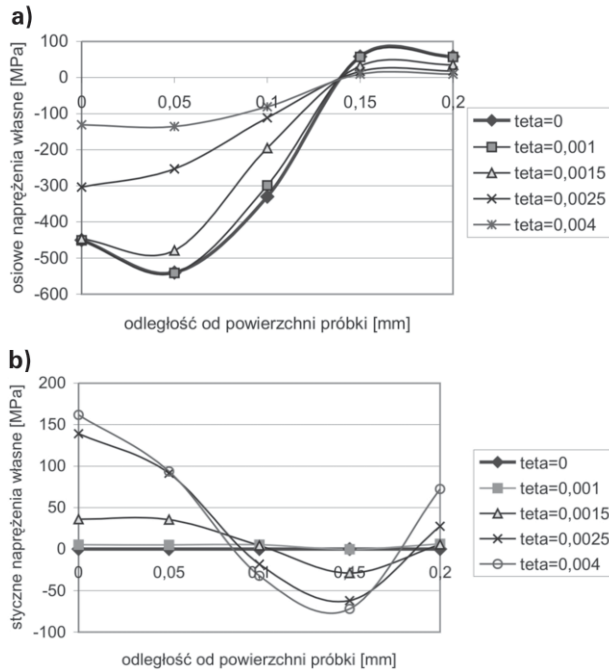
przypadku relaksacja naprężeń jest bardzo niewielka i nie zmienia się z podwyższaniem wartości amplitudy odkształcenia cyklicznego (rys. 4b). Specyficzny, wzajemny układ naprężeń własnych i podwyższonej granicy plastyczności powoduje, że pomimo silnych naprężeń ściskających uplastycznienie warstwy i rdzenia po stronie ściskania jest podobne i nie przyczynia się do dalszej relaksacji naprężeń.



Rys. 4. Ewolucja osiowych naprężeń własnych w warstwie nagniatanej po odciążeniu w półcyklu: a) rozciągania, b) ściskania

Wpływ obciążenia skręcającego na stan naprężeń osiowych przedstawiony jest na rys. 5a. Jak widać, skręcanie powoduje relaksację naprężeń osiowych, pomimo że nie ma na nie bezpośredniego wpływu. Relaksacja ta jest wynikiem uwzględnienia wieloosiowego stanu naprężeń w warstwie wierzchniej, a więc uwzględnienia w warunku plastyczności wszystkich istniejących składowych naprężeń.

Na rys. 5b pokazane są styczne naprężenia resztkowe, które nie występują jako naprężenia technologiczne, a tworzą się w wyniku częściowego uplas-

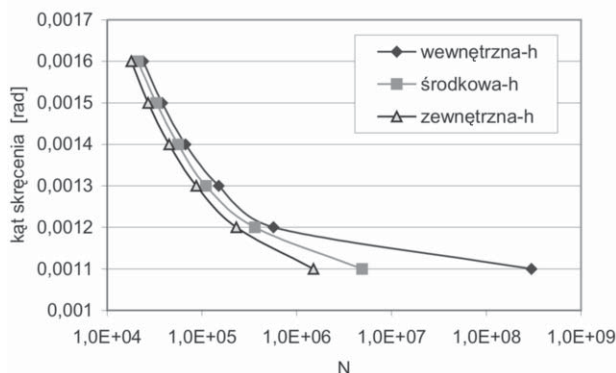


Rys. 5. Ewolucja osiowych naprężeń własnych po odciążeniu przy cyklicznym skręcaniu (a); ewolucja stycznych naprężeń własnych w warstwie nagniatanej po odciążeniu w cyklicznym teście skręcania (b)

tyczenia walca z warstwą wierzchnią poddanego skręcaniu. Ich specyficzny układ (dodatnie przy powierzchni próbki i ujemne w wewnętrznych strefach warstwy) może mieć znaczący wpływ na trwałość zmęczeniową.

Symulacja trwałości zmęczeniowej

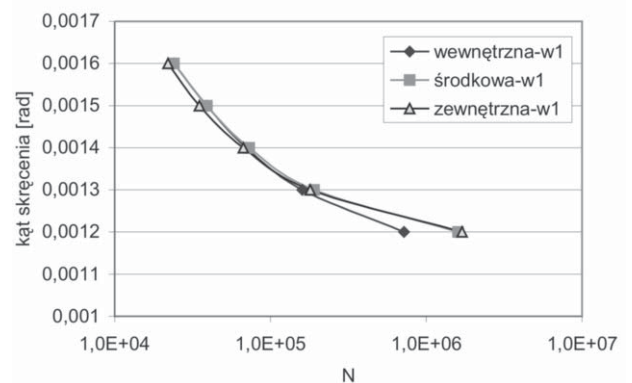
Obliczenia trwałości zmęczeniowej dla próbek walcowych jednorodnych (stal A516) oraz dla próbek



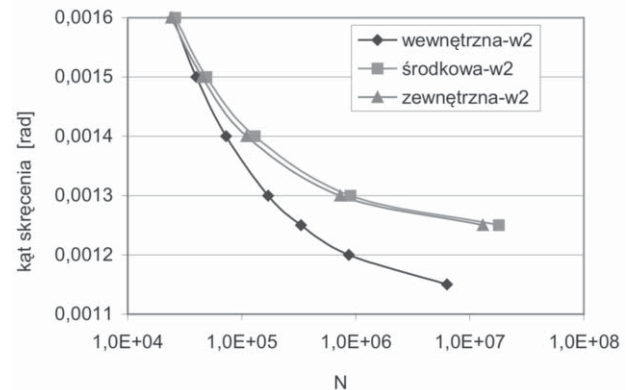
Rys. 6. Krzywe trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych stref dla próbki jednorodnej

z warstwą nagniataną typu w1 i w2. Próbkę były odkształcane momentem skręcającym przy ustalonej wartości kąta skręcania ($R = -1$). Aby uzyskać krzywe zmęczenia, symulacje przeprowadzono dla kątów skręcenia zmieniających się w zakresie od 0,013 do 0,0016 rad. Program komputerowy obliczał pętle histerezy do stanu ustabilizowanego, z uwzględnieniem relaksacji naprężeń własnych. Dla stanu ustabilizowanego wyznaczano wytrzymałość zmęczeniową próbek na podstawie kryteriów energetycznych. Przyjęto za Gołosiem [6], że o zniszczeniu decyduje energia będąca sumą energii odkształcenia plastycznego i energii odkształcenia sprężystego w półcyklu rozciągania. Dla każdego obliczonego przypadku wyznaczano energię całkowitą oraz liczbę cykli do zniszczenia. Wyniki badań symulacyjnych ilustrują rys. 6 – 8.

Na rys. 6–8 przedstawiono krzywe trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych stref warstw wierzchnich dla próbki jednorodnej oraz próbek z warstwą w1 i w2.



Rys. 7. Krzywe trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych stref dla próbki z warstwą wierzchnią typu w1



Rys. 8. Krzywe trwałości zmęczeniowej dla poszczególnych stref dla próbki z warstwą wierzchnią typu w2

Dla próbki jednorodnej (rys. 6) układ krzywych trwałości zmęczeniowej dla geometrycznie wydzielonych stref przypowierzchniowych wynika z natury procesu skręcania i zmęczenie zaczyna się w strefie zewnętrznej. W przypadku warstwy w1 (rys. 7) wprowadzenie niejednorodności materiałowej i naprężeń własnych powoduje, że zdolność do przeniesienia obciążeń cyklicznych jest bardzo zbliżona dla wszystkich stref warstwy, przy czym dla małych kątów skręcania o trwałości próbki decyduje strefa wewnętrzna.

Dla warstwy typu w2 trwałość zmęczeniową próbki limituje strefa wewnętrzna dla wszystkich kątów skręcenia (rys. 8). Widać zatem, że strefa wewnętrzna warstwy w2 i częściowo też warstwy w1 stanowią najsłabsze ogniwo próbki poddanej skręcaniu. Najlepiej przenosi obciążenia cykliczne zamodelowana przez nas zewnętrzna strefa warstwy typu w2 odpowiadająca procesowi intensywnego nagniatania.

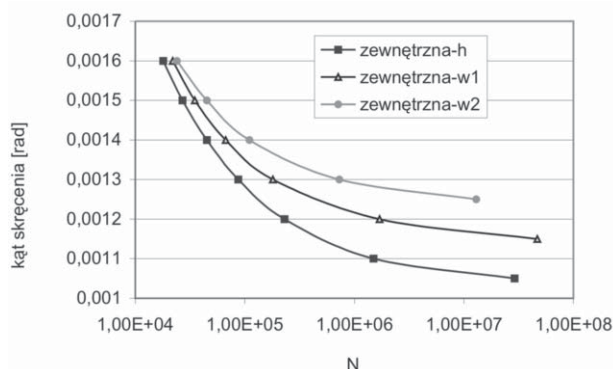
Na rys. 9 przedstawiono krzywe trwałości zmęczeniowej dla strefy zewnętrznej próbki jednorodnej oraz próbek z warstwami typu w1 i w2. Jak widać, najsłabsza jest strefa zewnętrzna próbki jednorodnej, a najmocniejsza warstwa w2. Identyczny układ obserwujemy dla pozostałych stref, przy czym we wszystkich przypadkach najsłabsza jest strefa wewnętrzna, w której zaszła najmniejsza deformacja plastyczna odpowiadająca najmniej intensywnemu nagniataniu.

Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki zastosowania programu symulacyjnego pozwalającego ocenić wpływ warstwy nagniatanej na przebieg procesu zmęczenia.

W wyniku przeprowadzonych symulacji na podstawie danych literaturowych dla stali A516 uzyskano pętle histerezy i stan naprężeń dla wszystkich stref modelowanej warstwy nagniatanej oraz krzywe trwałości zmęczeniowej dla tych stref. Wskazano na najsłabsze obszary w czasie procesu obciążania cyklicznego.

Zaprezentowany program pozwala analizować proces zmęczenia dla próbki z warstwą wierzchnią. Pozwala także wysuwać pewne propozycje czy sugestie dotyczące projektowania warstw pod kątem



Rys. 9. Krzywe trwałości zmęczeniowej dla strefy zewnętrznej próbki jednorodnej oraz próbek z warstwami typu w1 i w2

ich optymalnego zachowania w procesie zmęczenia wywołanego rozciąganiem lub skręcaniem.

LITERATURA

1. Mróz Z., Starzyński G.: An Elasto-Plastic Analysis of a Cylinder with Surface Layer under Cyclic Loading. *Archiwum Budowy Maszyn*, nr 3-4/1996.
2. Starzyński G., Kucharski S.: Evolution of the Residual Stress State in the Surface Layer of the Elements under Torsion. *AIMETA International Tribology Conference*, Sept. 20 – 22, L'Aquila, Włochy 2000.
3. Starzyński G., Kucharski S.: Simulation of Evolution of the Residual Stress in the Surface Layer under Tension and Torsion. *6th European Conference on Residual Stresses*, Coimbra, Portugal, 10 – 12 July 2002.
5. Przybylski W.: *Obróbka nagniataniem*. WNT, Warszawa 1979.
4. Kujawski D.: *Modelowanie trwałości zmęczeniowej i propagacji pęknięć w metalach*, *Prace Naukowe Mechanika*, z.133, Wydawnictwa PW, Warszawa 1991.
6. Gotoś K., Ellyin F.: *Multiaxial Fatigue Damage Criterion*. *J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 110, 1988.