



## Analiza naprężeń w tulei podczas realizacji stożkowego połączenia wciskowego

JULIAN SAWICKI<sup>1</sup>, LUCJAN ŚNIEŻEK, JOLANTA ZIMMERMAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Mechaniki i Poligrafii,  
02-524 Warszawa, ul. L. Narbutta 85  
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Budowy Maszyn,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych odkształceń i naprężeń w tulei podczas realizacji stożkowego połączenia wciskowego z uwzględnieniem wpływu demontażu i powtórnego wcisku. Przedmiotem badań były próbki wykonane z ulepszonej cieplnie stali C45. Przeprowadzono obliczenia numeryczne, dla których opracowano model uwzględniający osiowe przemieszczanie się czopa względem tulei, zgodnie z zarejestrowanymi pomiarami w trakcie praktycznej realizacji połączenia. Wyniki badań rozkładów naprężeń przedstawiono w postaci graficznej. Wartości naprężeń zastępczych uzyskanych podczas pomiarów tensometrycznych na powierzchni tulei są niższe o 2-35% od wyników uzyskanych na drodze numerycznej w zależności od siły wcisku. Symulacja demontażu połączenia wykazała obecność warstwy umocnionej, której granica plastyczności przekracza o 50 MPa granicę plastyczności materiału rodzimego elementów połączenia. Trwała deformacja tulei wywarła wpływ na wyliczone wartości i rozkład naprężeń w złączu podczas ponownej realizacji połączenia.

**Słowa kluczowe:** budowa i eksploatacja maszyn, połączenia wtlaczone, analizy numeryczne  
**Symbol UKD:** 621.88

### 1. Wstęp

Połączenia wtlaczone posiadają liczne zalety, co przekłada się na ich szerokie zastosowanie w przemyśle maszynowym. Do najważniejszych korzyści wynikających ze stosowania połączeń wtlaczanych zaliczamy dobre środkowanie elementów łączonych i łatwość wykonania przy stosunkowo niskim koszcie. W połączeniach odkształceniowych nie występuje luz pomiędzy elementami łączonymi w przeci-

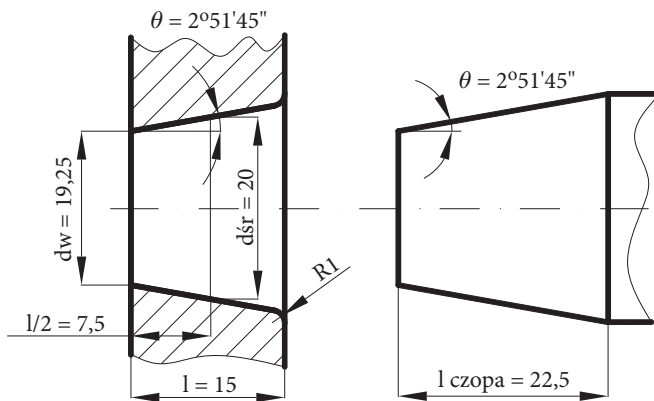
wieństwie do połączeń kształtowych. Luz w połączeniach kształtowych powiększa się z upływem czasu i ma znaczący wpływ na obecność niebezpiecznego obciążenia udarowego podczas eksploatacji przy zmiennym obciążeniu. W następstwie tych obciążeń dochodzi do uszkodzenia współpracujących powierzchni i przedwczesnego zużycia, a nawet utraty możliwości przenoszenia zadanego obciążenia. Dlatego połączenia wciskowe znajdują zastosowanie w warunkach przenoszenia cyklicznie zmiennych momentów skręcających. Niestety wadą połączeń włączanych jest kłopotliwy demontaż. To ograniczenie ma zdecydowanie mniejsze znaczenie przy połączeniach stożkowych, które mogą być montowane i demontowane wielokrotnie.

Połączenia wciskowe z powodu licznych zalet są ciągle przedmiotem zainteresowania konstruktorów, a tematyka związana z doskonaleniem metod obliczeniowych i wszechstronną analizą ich nośności jest nadal podejmowana przez wiele ośrodków badawczych [1-5]. Spośród wszystkich rodzajów połączeń włączanych najbardziej interesujące są połączenia stożkowe, z uwagi na liczne zalety, a w szczególności niewielkie wzajemne przemieszczenia łączonych elementów oraz możliwość zmniejszenia klasy dokładności wykonania elementów przy założeniu częściowego uplastycznienia się materiału.

Niniejsza praca jest fragmentem szerszych badań dotyczących wpływu obecności i głębokości strefy odkształceń plastycznych na nośność stożkowych połączeń włączanych. Wyniki dotychczasowych badań prezentowano między innymi w pracach [6-8]. Analizę stanu naprężenia i odkształcenia w elementach połączenia określono wówczas na podstawie wyników obliczeń numerycznych, przyjmując założenia upraszczające wykluczające między innymi względne przemieszczanie się czopa i tulei podczas realizacji połączenia. Takie założenie istotnie ogranicza odwzorowanie rzeczywistych warunków realizacji połączenia, co wywiera wpływ na wyliczone wartości i zasięg odkształcenia plastycznego. Stąd cel niniejszej pracy, obejmujący doświadczalną weryfikację wyników badań numerycznych oraz opracowanie modelu uwzględniającego przemieszczanie się czopa i tulei w trakcie wcisku.

## 2. Przedmiot i metodyka badań

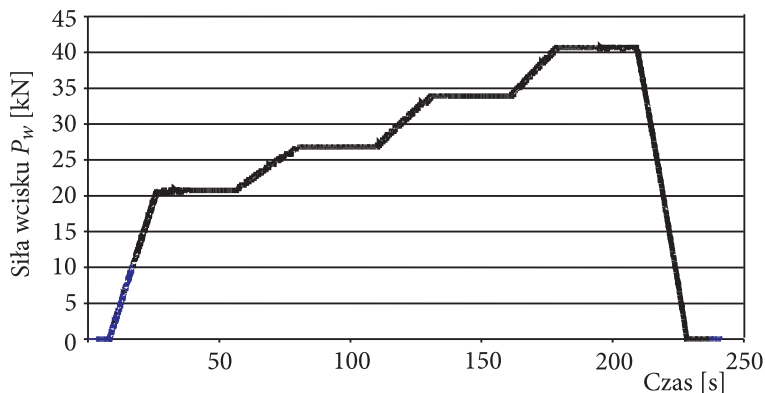
Badania przeprowadzono na próbkach złożonych z wałka i tulei wykonanych z ulepszonej cieplnie stali C45 wg PN-EN 10083-2:1999 (0,45% C, 0,59% Mn, 0,24% Si) o właściwościach wytrzymałościowych:  $R_{0,2} = 400$  MPa,  $R_m = 620$  MPa,  $A_5 = 15\%$ . Analizę numeryczną rozkładu odkształceń i naprężeń poprzedzono badaniami doświadczalnymi skojarzenia stożkowego czopa wałka oraz tulei, których geometrię przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wymiary tulei i czopa badanego połączenia

Pomiary naprężeń w trakcie realizacji wcisku przeprowadzono na stanowisku badawczym opisanym w pracy [8]. Opracowany program badań zakładał zbadanie naprężeń w próbkach poddanych cyklowi realizacji wcisku (wywołującego strefę odkształceń plastycznych o określonej głębokości) z uwzględnieniem demontażu i ponownej realizacji połączenia. Podczas łączenia wałka z tuleją próbkę obciążano stopniowo narastającą siłą wcisku, zgodnie z przebiegiem przedstawionym na rysunku 2, a następnie odciążono. Wartości siły wcisku dobrano na podstawie wyników analizy numerycznej stanu odkształcenia i naprężenia w elementach połączenia, opisanych w przytoczonych wcześniej pracach. Zgodnie z wynikami tej analizy, maksymalna wartość siły wcisku, wynosząca 41 kN powinna umożliwić uzyskanie 30% głębokości strefy odkształceń plastycznych tulei.

W trakcie realizacji wcisku ustalono wielkość przesunięcia czopa względem tulei. Zestawienie sił wcisku i odpowiadającego im zasięgu odkształceń plastycznych



Rys. 2. Przebieg zmian siły wcisku podczas realizacji badanego połączenia

tulei oraz przesunięć czopa względem tulei podczas pierwszego i drugiego wcisku przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Wartości sił wcisku  $P_w$  podczas realizacji połączenia

Siła wcisku $P_w$ [kN] (głębokość strefy odkształceń plastycznych)	21	26	33 (10%)	41 (30%)
Przesunięcie czopa względem tulei z [mm] (wcisk 1)	0,65	0,78	0,96	1,20
Przesunięcie czopa względem tulei z [mm] (wcisk 2)	0,18	0,22	0,30	0,42

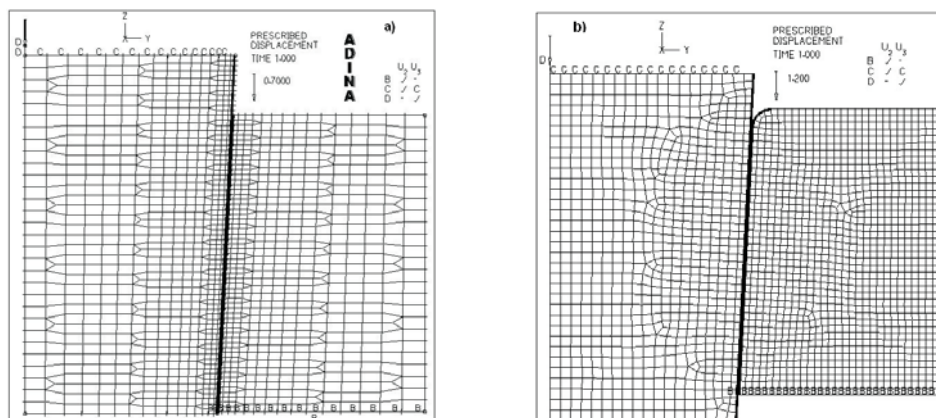
### 3. Analiza numeryczna odkształceń i naprężeń w trakcie realizacji stożkowego połączenia wciskowego

Podczas analizy numerycznej modelowano pola naprężeń i odkształceń w elementach połączenia wciskowego. Zagadnienie rozwiązano metodą elementów skończonych z uwzględnieniem kontaktu na powierzchniach styku elementów łączonych, przyjmując współczynnik tarcia na powierzchni czopa wałka i tulei  $\mu = 0,08$ . Współczynnik tarcia dobrano, wykonując wielokrotne obliczenia zmierzające do uzyskania zbieżności wykresów siły wcisku w funkcji przemieszczenia osiowego wałka, otrzymanych podczas praktycznej realizacji połączenia i obliczeń numerycznych. Do analizy numerycznej zastosowano program ADINA 8.3.1. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch geometrii tulei: bez zaokrąglenia i z zaokrągleniem o promieniu  $R = 1$  mm krawędzi otworu od strony montażu wałka.

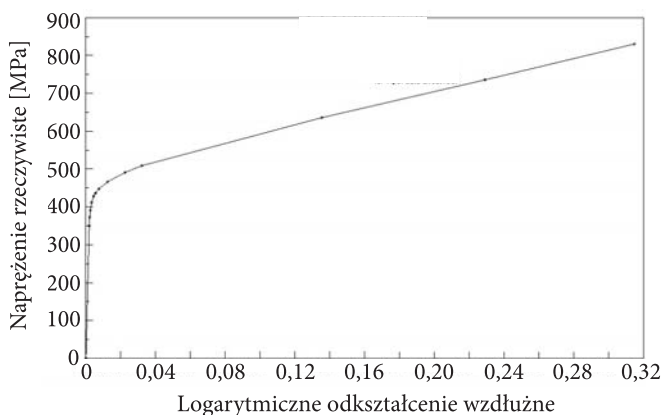
#### 3.1. Przyjęty model obliczeniowy

Zagadnienie realizacji badanego połączenia wciskowego potraktowano jako osiowo-symetryczne (wzdłuż osi zastosowano warunek brzegowy wynikający z symetrii: przemieszczenie w kierunku  $Y = 0$ ). Siatkę modelu zbudowano z 1920 elementów ośmiowęzłowych 2D osiowo-symetrycznych. Na rysunku 3 przedstawiono geometrię przyjętego modelu z podziałem na elementy oraz przyjętymi warunkami brzegowymi w przypadku tulei bez zaokrąglenia (rys. 3a) i z zaokrągleniem (rys. 3b) krawędzi otworu. Linia grubą zaznaczono powierzchnię kontaktu.

Zagadnienie potraktowano jako nieliniowe, z uwagi na obecność plastycznych odkształceń tulei. Do obliczeń przyjęto model materiału „plastic multilinear”. Został on opracowany na podstawie wyników statycznej próby rozciągania próbek z cieplnie ulepszonej stali C45. Na rysunku 4 przedstawiono krzywą rozciągania przyjętą do obliczeń.



Rys. 3. Geometria modelu połączenia wciskowego z warunkami brzegowymi dla tulei bez zaokrąglenia (a) i z zaokrągleniem krawędzi otworu (b)

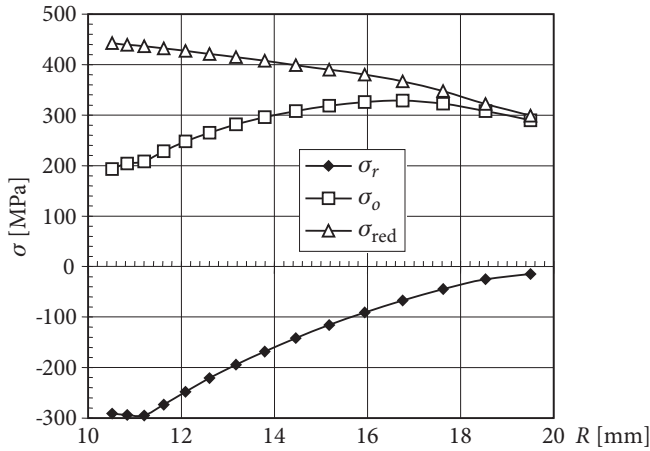


Rys. 4. Krzywa rozciągania przyjęta do obliczeń numerycznych (odniesiona do przekroju bieżącego) dla stali C45

### 3.2. Wyniki obliczeń

Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w formie graficznej w postaci pasm naprężeń i odkształceń oraz wykresów. Rysunek 5 przedstawia rozkłady naprężeń: promieniowych, obwodowych i zredukowanych, wyliczonych według hipotezy Hubera, na czołowej płaszczyźnie tulei (otwór bez zaokrąglenia) przy osiowym przemieszczeniu czopa  $z = 1,2$  mm.

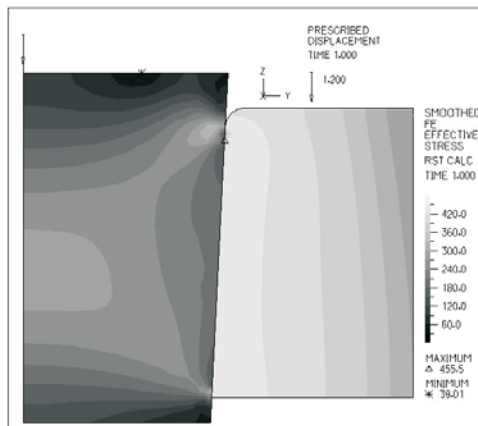
Uzyskane rozkłady naprężeń składowych znacząco odbiegały od naprężeń obliczonych na podstawie tensometrycznych pomiarów odkształceń przeprowadzonych na powierzchni tulei, w której wykonano zaokrąglenie krawędzi otworu, zwłaszcza



Rys. 5. Rozkład naprężeń promieniowych  $\sigma_r$ , obwodowych  $\sigma_o$  i zredukowanych  $\sigma_{red}$  na czołowej powierzchni tulei przy osiowym przemieszczeniu wałka  $z = 1,2$  mm (tuleja bez zaokrąglenia krawędzi otworu)

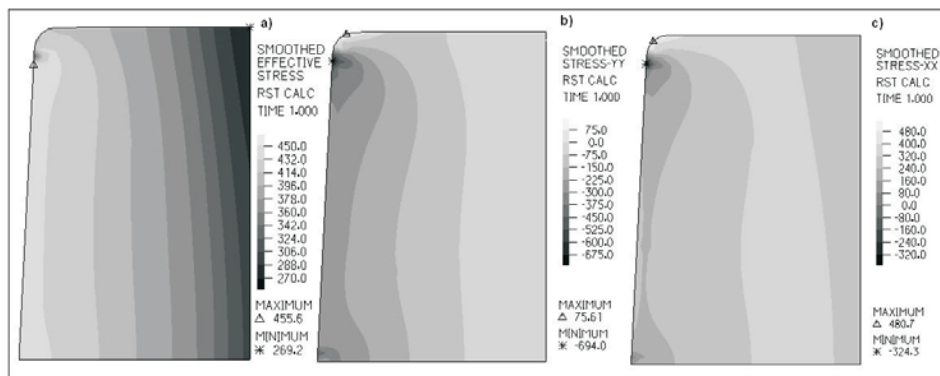
w strefie kontaktu tulei i wałka. W przypadku naprężeń promieniowych różnice te sięgają kilkuset procent. Obserwowany efekt spiętrzenia naprężeń opisany już został m.in. w pracy [9]. Z tego względu do dalszych obliczeń przyjęto geometrię tulei z zaokrągleniem otworu o promieniu  $R = 1$  mm, zgodnie z rysunkiem 1. Dalsze wyniki obliczeń będą prezentowane dla tej geometrii połączenia.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkłady naprężeń zredukowanych w połączeniu uzyskanych przy osiowym przemieszczeniu czopa względem tulei  $z = 1,2$  mm, odpowiadającemu powstaniu 30-procentowej głębokości strefy odkształceń plastycznych.



Rys. 6. Pasma naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  w połączeniu przy osiowym wcisku 1,2 mm dla tulei z promieniem zaokrąglenia otworu  $R = 1$  mm

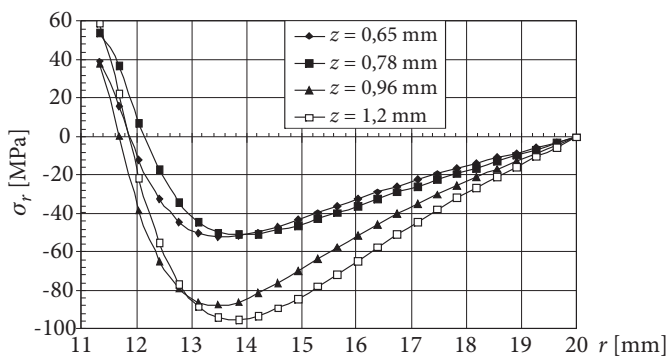
Uwzględnienie zaokrąglenia krawędzi otworu tulei znalazło swoje odzwierciedlenie w wyliczonych wartościach maksymalnych i rozkładach naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$ , promieniowych  $\sigma_r$  i obwodowych  $\sigma_\theta$ , które przedstawiono na rysunku 7.



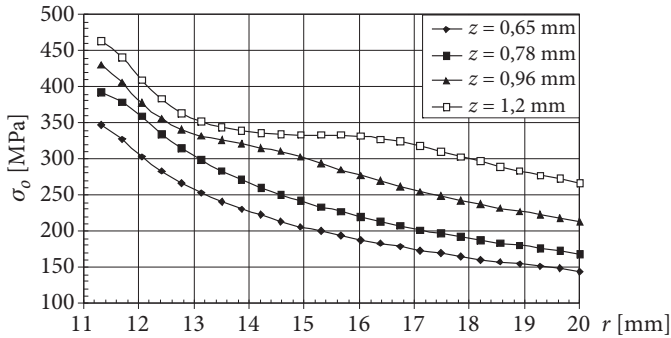
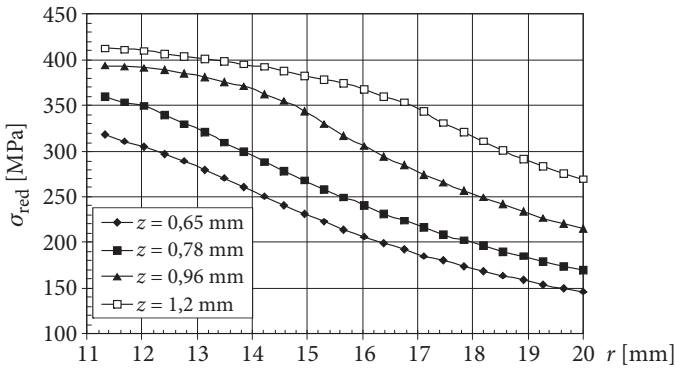
Rys. 7. Rozkład naprężeń: zredukowanych  $\sigma_{red}$ , promieniowych  $\sigma_r$  i obwodowych  $\sigma_\theta$  w tulei przy osiowym wcisku 1,2 mm (30% głębokość strefy odkształceń plastycznych)

Bardziej czytelną formą prezentacji otrzymanych wyników obliczeń okazały się wykresy przedstawione na rysunkach 8-10, na których rozkłady naprężeń promieniowych, obwodowych i zredukowanych na czołowej płaszczyźnie tulei ujęto w zależności od promienia tulei  $r$  dla różnych osiowych przemieszczeń czopa  $z$  podczas realizacji połączenia.

Analiza numeryczna naprężeń w płaszczyźnie czołowej tulei po stronie realizacji połączenia wykazała istotny wpływ geometrii krawędzi otworu tulei na wartość otrzymanych wyników. Uzyskany rozkład występuje w wąskiej warstwie materiału



Rys. 8. Rozkłady naprężeń promieniowych  $\sigma_r$  na powierzchni czołowej tulei

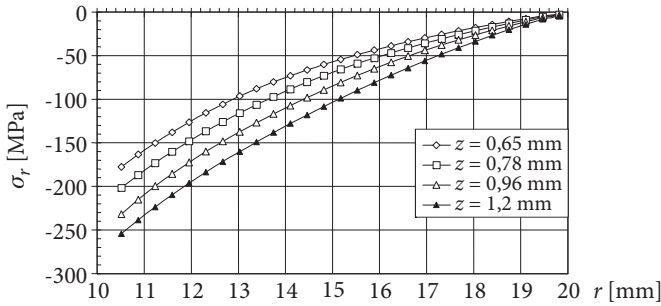
Rys. 9. Rozkład naprężeń obwodowych  $\sigma_0$  na powierzchni czołowej tuleiRys. 10. Rozkład naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  na powierzchni czołowej tulei

i nie odzwierciedla rzeczywistego stanu naprężeń na całej długości skojarzenia. Z tego względu badania poszerzono o obliczenia naprężeń promieniowych, obwodowych i zredukowanych w przekroju połączenia zlokalizowanym w połowie jego długości. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach (rys. 11-13).

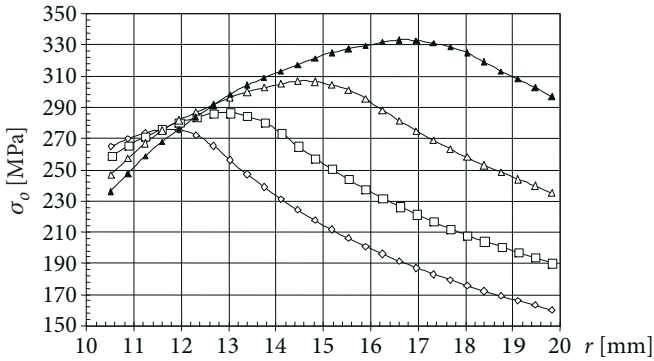
Charakter uzyskanych przebiegów odbiega od rozkładów uzyskanych na powierzchni czołowej tulei. Różnice dotyczą w głównej mierze naprężeń promieniowych i obwodowych na długości 5 mm od początku skojarzenia. Obserwowany niższy poziom naprężeń promieniowych na czole tulei spowodowany jest brakiem kontaktu z czopem (zaokrąglenie tulei w otworze). W rezultacie wyliczone naprężenia zredukowane są tu o 10-30% niższe niż w połowie długości skojarzenia, jednak charakter zmian tych naprężeń na całej długości połączenia jest zbliżony.

W przypadku analizy wpływu wielokrotnej realizacji połączenia na jego nośność i stan naprężeń w skojarzeniu, zachodzi konieczność oceny zasięgu odkształceń plastycznych i naprężeń resztkowych występujących w tulei po demontażu połączenia. Ich wielkość wywiera wpływ na naprężenia w złączu podczas kolejnych

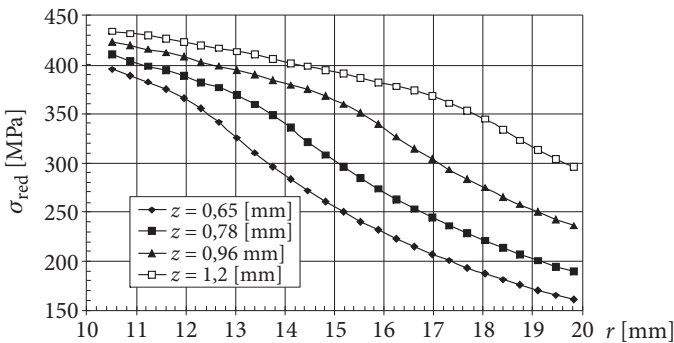




Rys. 11. Rozkład naprężeń promieniowych  $\sigma_r$  w połowie długości tulei



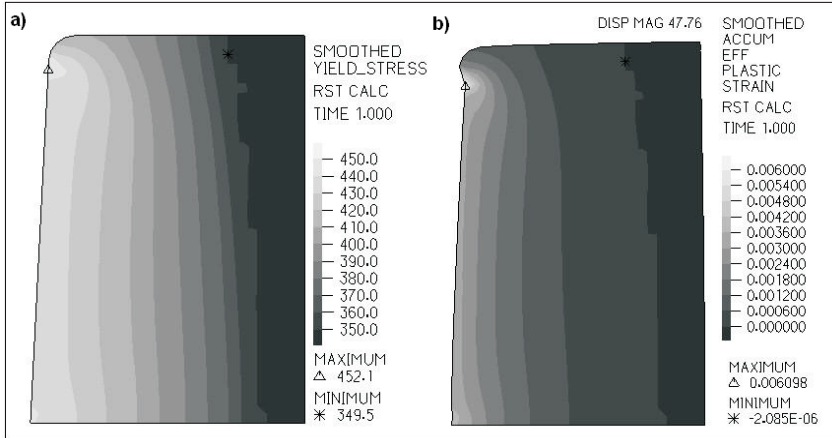
Rys. 12. Rozkład naprężeń obwodowych  $\sigma_o$  w połowie długości tulei



Rys. 13. Rozkład naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  w połowie długości tulei

montaży, a w konsekwencji na zdolność do przenoszenia obciążenia. Demontaż połączenia zamodelowano poprzez przyłożenie siły osiowej i wyciśnięcie wałka. Skutki realizacji połączenia siłą 41 kN w postaci pasm ilustrujących zasięg zmiany granicy plastyczności oraz odkształceń plastycznych materiału tulei przedstawiono

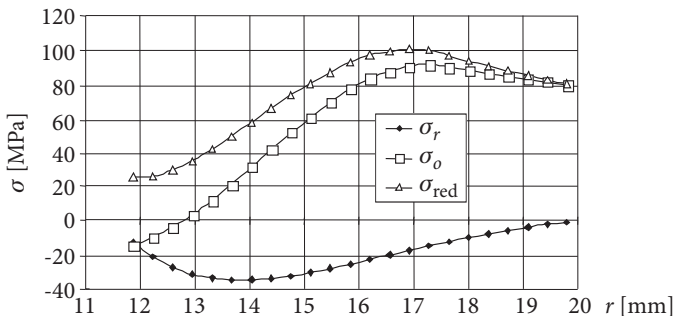
na rysunku 14. Stwierdzono umocnienie materiału tulei, a w konsekwencji podniesienie granicy plastyczności do 450 MPa w pobliżu powierzchni otworu (rys. 14a).



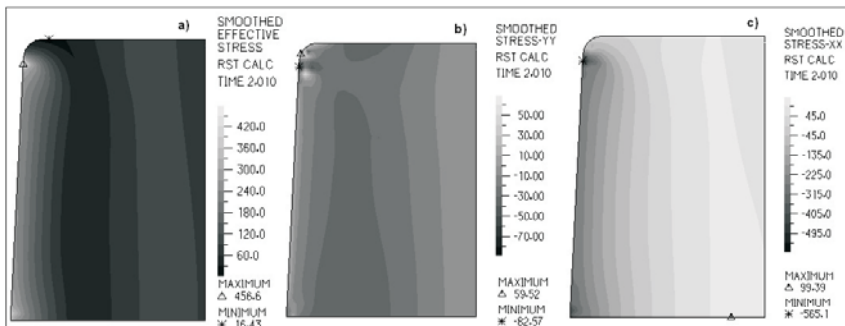
Rys. 14. Zasięg zmian granicy plastyczności (a) i odkształceń (b) w tulei po demontażu połączenia zrealizowanego siłą 41 kN

Trwałą deformację tulei, na tle pasm odkształceń plastycznych, zaprezentowano w powiększeniu na rysunku 14b.

Realizacja połączenia, w którym występują trwałe odkształcenia tulei, powoduje obecność naprężeń resztkowych w tulei po rozłączeniu skojarzenia. Przykład rozkładu naprężeń zredukowanych i składowych (promieniowych i obwodowych) wyznaczonych na czołowej powierzchni tulei po demontażu połączenia zrealizowanego siłą 41 kN przedstawiono na rysunku 15.



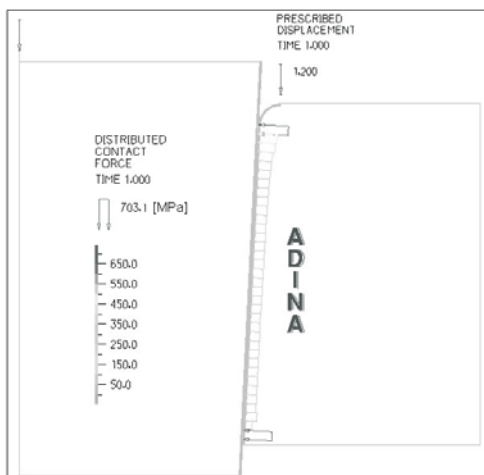
Rys. 15. Rozkład resztkowych naprężeń: promieniowych  $\sigma_r$ , obwodowych  $\sigma_o$  i zredukowanych  $\sigma_{red}$  na czołowej powierzchni tulei po demontażu połączenia zrealizowanego siłą 41 kN



Rys. 16. Rozkład resztkowych naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  (a); promieniowych  $\sigma_r$  (b); obwodowych  $\sigma_o$  (c) w przekroju osiowym tulei po demontażu połączenia zrealizowanego siłą 41 kN

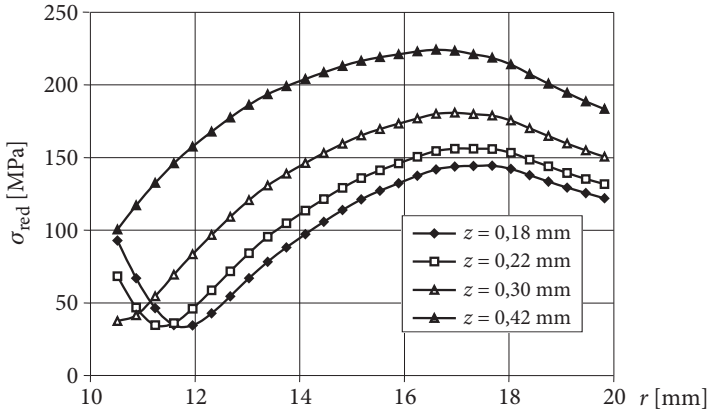
Obecność resztkowych naprężeń w tulei obserwuje się również w przekroju osiowym tulei (rys. 16). Na podstawie otrzymanych rozkładów naprężeń można stwierdzić, że wprowadzenie zaokrąglenia tulei o promieniu  $R = 1$  powoduje przemieszczenie miejsca koncentracji naprężeń w okolicę przejścia tworzącej stożka zarysu w zaokrąglenie krawędzi otworu. Trwałe odkształcenie tulei w tym obszarze powoduje podczas realizacji wcisku siłą 41 kN trzykrotne zmniejszenie naprężeń promieniowych.

Z prezentowanych wyników obliczeń wynika, że koncentracja naprężeń w tulei jest zlokalizowana w obszarach wejścia i wyjścia w kontakt z czopem. Potwierdzają to również rozkłady sił kontaktowych przedstawione na rysunku 17.

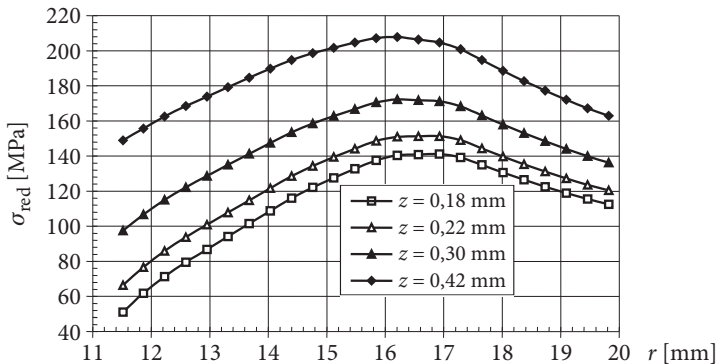


Rys. 17. Rozkład sił kontaktowych podczas realizacji stożkowego połączenia wtlaczanego siłą 41 kN

Po demontażu połączenia dokonano ponownego wcisku. Wykresy przedstawiające rozkład naprężeń zredukowanych otrzymanych na czole tulei i w przekroju połączenia zlokalizowanym w połowie jego długości dla rozpatrywanych sił wcisku przedstawiono na rysunkach 18-19. Otrzymane wykresy wyraźnie różnią się od wykresów uzyskanych podczas analizy połączenia wykonanego po raz pierwszy (rys. 10 i 13). Dla przypadku rozpatrywanego połączenia zrealizowanego za pomocą siły 41 kN ( $z = 0,42$  mm) naprężenie zastępcze na czole tulei zmienia się i wynosi 100-220 MPa. Jest zatem dwukrotnie mniejsze niż po pierwszym wcisku. Wartość maksymalną naprężenia zlokalizowano w pobliżu połowy długości powierzchni stożkowej skojarzenia. Można to wytłumaczyć pozostałymi w tulei po pierwszym wcisku strefami odkształceń plastycznych i warstwami materiału o podwyższonej granicy plastyczności.



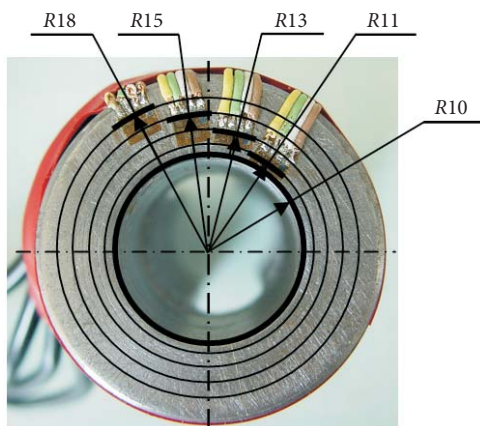
Rys. 18. Rozkład naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  na powierzchni czołowej tulei po powtórnej realizacji wcisku



Rys. 19. Rozkład naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  w połowie długości tulei po powtórnej realizacji wcisku

#### 4. Wyniki badań doświadczalnych

Badania doświadczalne odkształceń i naprężeń przeprowadzono za pomocą rozet prostokątnych EA-06-030TU-120 firmy VISHAY. W układzie pomiarowym wykorzystano system pomiarowy ESAM TRAVELLER Plus. Rozety z tensometrami ułożonymi w kierunkach obwodowym i promieniowym naklejono na powierzchni czołowej tulei w odległościach 11, 13, 15 i 18 mm od osi połączenia, co odpowiada odległości 1, 3, 5 i 8 mm od krawędzi otworu, zgodnie z rysunkiem 20.

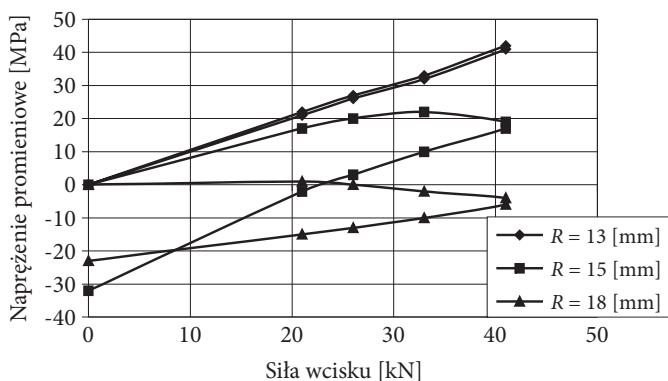


Rys. 20. Rozmieszczenie rozet pomiarowych na powierzchni czołowej tulei

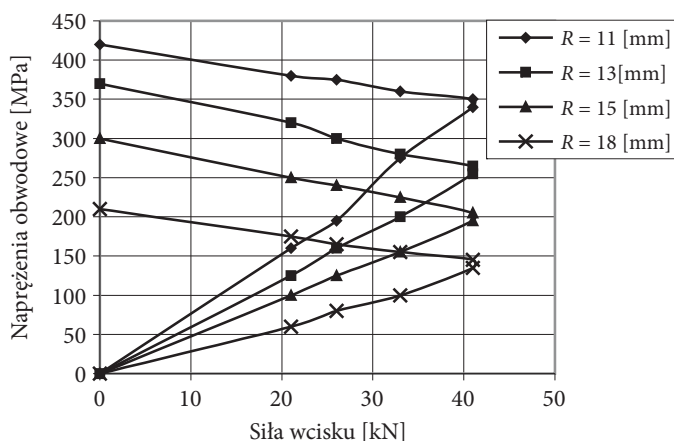
Takie ułożenie tensometrów umożliwiło analizę odkształceń tulei na całej jej grubości oraz, po obliczeniu naprężeń, porównanie wyników pomiarów tensometrycznych z wynikami uzyskanymi podczas analizy numerycznej.

Wybrane przebiegi zmian naprężenia promieniowego na czołowej płaszczyźnie tulei podczas realizacji połączenia siłą 41 kN, wywołującą uplastycznienie 30% warstwy tulei przedstawiono na rysunku 21. Tensometr naklejony w odległości 3 mm od krawędzi otworu tulei wykazał obecność odkształceń odpowiadających naprężeniom dodatnim sięgającym 40 MPa, a po odciążeniu połączenia nie stwierdzono obecności odkształceń tej warstwy. Tensometry naklejone w odległościach 5 mm i 8 mm od krawędzi otworu tulei wykazały po realizacji i odciążeniu połączenia obecność naprężeń ujemnych sięgających 30 MPa.

Odciążenie zrealizowanego połączenia wpływa również na wzrost dodatnich naprężeń obwodowych do wartości sięgającej 425 MPa w odległości 1 mm od krawędzi otworu (rys. 22). Jest to prawdopodobnie wynik obecności naprężenia stycznego, wywołanego siłą oporu, przeciwdziałającą powstaniu połączenia oraz pozostałymi przy odciążeniu naprężeniami resztkowymi.

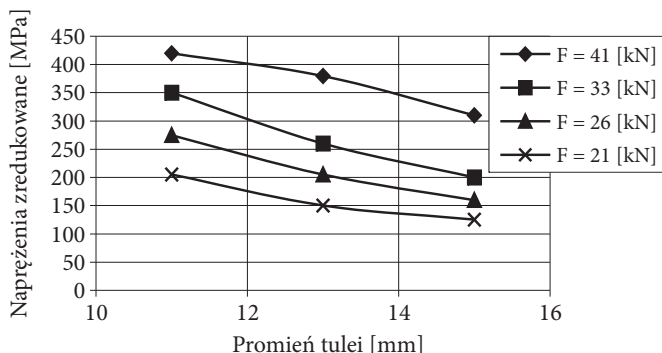


Rys. 21. Wykres zmian naprężeń promieniowych  $\sigma_r$  na powierzchni czołowej tulei w trakcie stopniowo narastającej siły wcisku i odciążania połączenia



Rys. 22. Wykres zmian naprężeń obwodowych  $\sigma_o$  na powierzchni czołowej tulei w trakcie stopniowo narastającej siły wcisku i odciążania połączenia

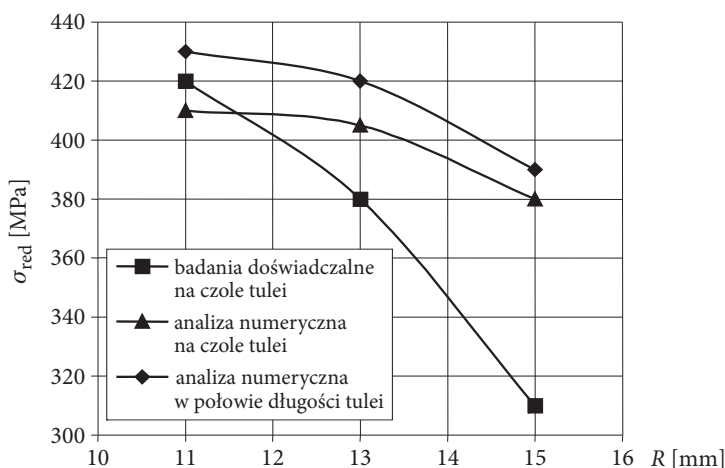
Rozkład naprężeń zredukowanych wyliczonych w oparciu o hipotezę Hubera-Misesa przedstawiono w postaci wykresu na rysunku 23. Wyniki obliczeń przeprowadzone dla rozpatrywanych sił wcisku wskazują na obecność naprężeń mniejszych o 2-35% w porównaniu z wynikami obliczeń numerycznych. Różnice te rosną wraz ze zmniejszaniem siły wcisku.



Rys. 23. Wykres zmian naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  w trakcie realizacji połączenia

## 5. Porównanie wyników badań doświadczalnych i analizy numerycznej

Wyniki analizy numerycznej oraz badań doświadczalnych odkształceń i naprężeń w elementach połączenia wciskowego stożkowego wykazują zadowalającą zgodność dla sił wcisku wywołujących w tulei odkształcenia plastyczne ( $F = 33$  kN i 41 kN). Na rysunku 24 przedstawiono porównanie wartości naprężeń zredukowanych na powierzchni czołowej oraz w połowie długości tulei wyliczonych na podstawie pomiarów tensometrycznych oraz metodą numeryczną dla siły wcisku  $F = 41$  kN. Dla  $R = 1$  mm różnice między wartościami wyliczonych naprężeń wynoszą od 2 do 4%. W zakresie  $R = 13$  mm różnice między naprężeniami zredukowanymi obliczonymi



Rys. 24. Wykres zmian naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  uzyskanych doświadczalnie i numerycznie na powierzchni czołowej oraz w połowie długości tulei podczas realizacji połączenia siłą  $F = 41$  kN

numerycznie na czole tulei i w jej środku pozostają na poziomie 2%, natomiast naprężenia wyznaczone doświadczalnie są o 10% niższe od obliczonych numerycznie w połowie tulei i 7% niższe od obliczonych numerycznie na czole tulei.

## 6. Podsumowanie

W pracy podjęto próbę numerycznego i doświadczalnego określenia odkształceń i naprężeń w tulei w trakcie realizacji stożkowego połączenia wciskowego. W opracowanym modelu numerycznym uwzględniono siłę tarcia towarzyszącą procesowi łączenia. Przyjęcie w obliczeniach numerycznych uproszczenia polegającego na pominięciu zaokrąglenia krawędzi otworu tulei powoduje duży błąd wartości naprężeń promieniowych odczytywanych na powierzchni czołowej tulei, uniemożliwiający analizę porównawczą z wynikami badań doświadczalnych. Z tego względu opracowano model uwzględniający zaokrąglenie krawędzi otworu tulei. Wyniki obliczeń przeprowadzonych dla takiej geometrii połączenia pozwoliły na poprawę zgodności uzyskanych wyników, zwłaszcza dla połączeń, w których wystąpiły strefy odkształceń plastycznych ( $F = 33$  kN i 41 kN). Wielkości naprężeń zredukowanych uzyskanych na podstawie pomiarów tensometrycznych w sąsiedztwie krawędzi otworu są niższe o 2-10% od wyników uzyskanych na drodze numerycznej. Różnice te wzrastają do 35% w przypadku realizacji wcisku mniejszymi siłami ( $F = 21$  kN i 26 kN). Różnice wartości naprężeń policzonych na podstawie pomiarów odkształceń i otrzymanych z obliczeń numerycznych można uzasadnić uśrednieniem pomiaru na długości pomiarowej zastosowanych tensometrów równej 0,76 mm, wpływem zaokrąglenia krawędzi otworu, a w konsekwencji brakiem kontaktu elementów łączonych w tej strefie oraz obecnością błędów kształtu i położenia w zrealizowanym połączeniu.

Obecność zaokrąglenia krawędzi otworu wpływa na zwiększenie podatności tulei, a w konsekwencji przemieszczenie maksymalnych naprężeń zredukowanych w głąb tulei. Stąd różnice między wartością naprężeń obliczonych metodą numeryczną w połowie długości połączenia a wynikami obliczeń i pomiarów wykonanych na powierzchni czołowej tulei, sięgające 20%. Fakt ten należy uwzględnić podczas interpretacji wyników pomiarów tensometrycznych.

Analiza stanu odkształceń i naprężeń po demontażu połączeń z obecnością stref odkształceń plastycznych wykazała obecność w tulei naprężeń resztkowych. Trwała deformacja materiału tulei wywiera wpływ na wartość i rozkład naprężeń wywołanych ponowną realizacją wcisku. Maksymalne naprężenia zredukowane w tulei zmniejszyły się o połowę. Potwierdziły to zarówno analiza numeryczna, jak i badania doświadczalne.



Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2009 r.

## LITERATURA

- [1] S. GUZOWSKI, *Analiza zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych na przykładzie osi zestawów kołowych pojazdów szynowych*, seria: Mechanika, Monografia, 284, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2003.
- [2] S. KISIEL, Z. BRONIEC, *Identyfikacja naprężeń w tulei połączenia wciskowego w badaniach eksperymentalnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, seria: Mechanika, 69, 271, 2001, 27-34.
- [3] S. S. KIMM, D. G. LEE, *Design of the hybrid composite journal bearing assembled by interference fit*, Elsevier, Composite Structures, 2006, 222-230.
- [4] K. GRUDZIŃSKI, A. GAŚKA, *Obliczanie nośności płaskiego połączenia wciskowego przy uwzględnieniu poślizgów lokalnych*, XVII Sympozjum PKM, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin-Nałęczów, 1995, 301-306.
- [5] Y. ZHANG, B. MCCLAIN, X. D. FANG, *Design of interference fits via finite element method*, Elsevier, Mechanical Sciences, 2000, 1835-1850.
- [6] CZ. GOSS, J. SAWICKI, L. ŚNIEŻEK, T. ŚLĘZAK, *Badania nośności stożkowych połączeń wciskowych z uwzględnieniem stref odkształceń plastycznych*, XXII Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gdynia Jurata, 3, 2005, 65-70.
- [7] CZ. GOSS, J. SAWICKI, L. ŚNIEŻEK, T. ŚLĘZAK, *Analiza doświadczalna trwałości zmęczeniowej stożkowych połączeń włączanych*, IX Międzynarodowe Sympozjum IPMiT „Pojazdy 2005”, Rynia, 1, 2005, 273-280.
- [8] CZ. GOSS, J. SAWICKI, L. ŚNIEŻEK, *Analiza doświadczalna naprężeń w stożkowych połączeniach wciskowych*, XXIII Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Przemysł, 2007, 38-45.
- [9] A. KRUKOWSKI, J. TUTAJ, *Połączenia odkształceniowe*, wyd. I, PWN, Warszawa, 1987.

J. SAWICKI, L. ŚNIEŻEK, J. ZIMMERMAN

**Stress analysis in a bush while assembling a conical interference fit joint**

**Abstract.** This paper presents theoretical and experimental study of stress and strain distribution in a conical interference fit joint. This study deals with the process of disassembling and reassembling the joint. Specimens used during the research were made of heat treated steel C45. The finite element method (FEM) was used to perform the calculation. Numerical analyses required creating a model based on laboratory research which includes axial shaft displacement. The stress and strain distributions were presented as bands and graphs. The effective stress obtained on laboratory research using strain gauge differs from effective stress based on FEM calculation and is lower of about 2-35%. The calculation revealed existence of the strengthened layer in a bush which has 50 MPa higher yield point. The presence of residual stress after disassembling the joint influenced stress and strain distribution after reassembling the joint.

**Keywords:** mechanical engineering and machinery maintenance, interference fit joints, finite element method

**Universal Decimal Classification:** 621.88

