



Kraków, dn. 29. 01. 2021

Dr hab. inż. Wojciech Maziarz, prof. PAN

Recenzja pracy doktorskiej Pani mgr inż. Beaty CHRZĄSZCZ

pt. *„Zastosowanie modelowania metodą elementów skończonych do optymalizacji
właściwości klamer do osteosyntezy”*

(wykonana na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Inżynierii Materiałowej Wydziału Nauk
Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, z dnia 27.11.2020)

Informacja wstępna

Efekty pamięci kształtu i supersprężystości związane z termosprężystą przemianą martenzytyczną stanowią zainteresowanie naukowo-badawcze począwszy od końca lat sześćdziesiątych XX wieku, po dzień dzisiejszy. Wiąże się to ze szczególnym zachowaniem się materiału w obecności przyłożonego obciążenia, temperatury lub pola magnetycznego, mające znamiona zachowania „inteligentnego” (powracająca zmiana kształtu lub zmiana temperatury) wykorzystywanego w szerokiej gamie urządzeń wykonanych z zastosowaniem tych materiałów. Jednymi z pierwowzorów, a zarazem najbardziej rozpowszechnionymi materiałami wykazującymi tzw. konwencjonalny efekt pamięci kształtu i efekt supersprężysty są stopy z układu Ni-Ti, w chwili obecnej szeroko wdrożone do produkcji komercyjnej dla szeregu zastosowań, w wielu gałęziach przemysłu. Pomimo, że ciągle wzrasta produkcja światowa stopów Ni-Ti, wciąż istnieje duże zainteresowanie badawcze, odzwierciedlone niemalejącą liczbą prac naukowych publikowanych corocznie w literaturze krajowej i światowej lub prezentowanych na konferencjach tematycznych.

Obecnie jedną z ważniejszych dziedzin zastosowania supersprężystych stopów NiTi jest medycyna, w szczególności chirurgia, w której to wykorzystuje się je głównie w postaci klamer do łączenia odłamów kostnych, kręgów kręgosłupa, leczenia skoliozy, usztywniania kręgów szyjnych a nawet zszywania tkanek miękkich. W czasach gwałtownego rozwoju maszyn numerycznych, a w szczególności ich wydajności i specjalistycznego oprogramowania, modelowanie numeryczne procesów inżynierskich stało się powszechne i ogólnodostępne. W inżynierii materiałowej bardzo popularna jest Metoda Elementów Skończonych (MES) pozwalająca na modelowanie procesów technologicznych (procesy odlewnicze, przeróbka plastyczna) jak i właściwości materiałów, w szczególności właściwości mechanicznych. Uznaje się, że najbardziej wartościowe prace badawcze, często prezentowane w najlepszych czasopismach opierają się również na modelowaniu zachodzących zjawisk fizycznych. Niezmiernie istotne wydają się wykorzystanie modelowania numerycznego materiałów dla zastosowań medycznych, ze względu na istotne ograniczenie badań klinicznych, często

budzących zastrzeżenia etyczne, jak i szybszego wprowadzenia na rynek produktu związanego z leczeniem potrzebujących pacjentów.

Dlatego też, przedstawiona tematyka rozprawy dotycząca zastosowania modelowania numerycznego MES do optymalizacji właściwości klamer do osteosyntezy wykonanych z supersprężystego stopu NiTi łączy trzy dziedziny tj. modelowanie numeryczne oparte na matematyce, medycynę oraz inżynierię materiałową, co czyni ją niezwykle aktualną w aspekcie naukowym i atrakcyjną w aspekcie aplikacyjnym.

Ocena merytoryczna i metodologiczna rozprawy

Istotą recenzowanej rozprawy była eksperymentalna weryfikacja wyników modelowania rzeczywistych klamer wykonanych z supersprężystego stopu NiTi dla ich całego typoszeregu oraz modyfikacja istniejących klamer w celu polepszenia ich właściwości klinicznych. Na podstawie literatury oraz posiadanej wiedzy autorki rozprawy, została postawiona teza brzmiąca następująco: *wykorzystanie modelowania metodą elementów skończonych może doprowadzić do optymalizacji właściwości klinicznych klamer stosowanych do osteosyntezy*. W celu udowodnienia niniejszej tezy zaplanowano do realizacji pięć zadań zawierających: zamodelowanie typoszeregu klamer rzeczywistych, pomiar ich wybranych właściwości niezbędnych do zbudowania modelu, porównanie wyników modelowania z wynikami eksperymentalnymi, wprowadzenie modyfikacji klamry w celu poprawy jej właściwości oraz numeryczna weryfikacja właściwości klinicznych zmodyfikowanej klamry.

Rozprawa zawiera bardzo przejrzysty i wyczerpujący opis teoretyczny dotyczący stopów z pamięcią kształtu i efektów w nich zachodzących, aspektów biokompatybilności i zgodności medycznej jak również zastosowania ich w medycynie. Bardzo interesujący jest rozdział dotyczący klamer medycznych opisujący szeroki zakres ich zastosowania w medycynie, zasadę ich działania w różnych przypadkach leczenia oraz zalety efektu supersprężystego wykorzystywanego w klamrach. Co ważne, część teoretyczna związana z opisem metody elementów skończonych, zastosowanie jej w biomechanice oraz opis programu ANSYS również przedstawiane są bardzo przystępnie, nawet dla czytelnika nie będącego specjalistą w tej dziedzinie. **Dlatego też należy uznać, że doktorantce udało się trudna sztuka wybrania i przedstawienia skomplikowanej wiedzy z trzech różnych dziedzin nauki w bardzo przystępnej formie, co uznaję za duże osiągnięcie pracy.**

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla typoszeregu siedmiu klamer wykonanych z drutu NiTi o średnicy 1, 4 i 1,5 mm (najbardziej zbliżonej do średnicy drutów stosowanych w klamrach komercyjnych tj. 1,3 mm) o różnej długości, którym nadano odpowiednie kształty w wyniku lokalnego nagrzewania i gięcia. Parametry wyjściowe materiału (naprężenia charakterystyczne przemian fazowych σ_s^{AS} , σ_f^{AS} , σ_s^{SA} , σ_f^{SA} oraz moduł Younga E) potrzebne do modelowania określono na podstawie statycznej próby rozciągania w temperaturze pokojowej. Co istotne, powtórzono je pięciokrotnie dla każdej średnicy w celu zapewnienia odpowiedniej statystyki wykonanych pomiarów. Stwierdzono, że zarówno moduł sprężystości Younga jak i naprężenia charakterystyczne przemian fazowych różnią się dla obydwu badanych średnic, co nie powinno mieć miejsca w przypadku badania tego samego materiału. Zjawisko to tłumaczy się różną obróbką plastyczną, większym zgniotem, a tym samym umocnieniem dla próbek o mniejszej średnicy, co potwierdzają wyniki wyższych wartości naprężeń dla tychże próbek. Jednakże, uzyskane wartości modułu Younga mieściły

się w zakresie wartości deklarowanych przez producenta badanych drutów. Istotnym również okazało się wyznaczenie parametru ε_L (maksymalne odkształcenie, poniżej którego odkształcenie jest odwracalne), który określono jako 0,05 dla obydwu średnic i był niższy niż zazwyczaj stosowany zawarty w bibliotece programu ANSYS, określany na poziomie 0,07-0,1. Badania eksperymentalne uzupełniono o badania trójosiowego zginania, skaningową kalorymetrię różnicową, analizę fazową metodą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego i analizę składu chemicznego metodą dyspersji promieniowania rentgenowskiego, które generalnie potwierdziły możliwość zastosowania badanych stopów NiTi jak materiałów na klamry pracujące z wykorzystaniem efektu supersprężystego. W dalszym etapie wykonane klamry poddano rozciąganiu w celu wyznaczania zakresu siły powodującej przemieszczenie ramion klamry w zakresie supersprężystym. Stwierdzono, że przy przemieszczeniu ramienia klamry o około 2 mm efekt nie występuje, dlatego też klamry poddano dodatkowej obróbce cieplnej polegającej na wyżarzaniu w temperaturze 500 °C przez 30 min i szybkim chłodzeniu w wodzie. Przeprowadzono również statyczny pomiar siły w klamrach po obróbce cieplnej symulujący rzeczywiste warunki pracy klamry w organizmie człowieka. Badania przeprowadzono na specjalnie skonstruowanym urządzeniu, otrzymane wyniki zestawiono w Tabeli 14 (str. 89). Stwierdzono, że stabilizacja siły następuje po 15 min od rozpoczęcia testu i jest stabilna przez 5 godzin, wyniki te są bardzo obiecujące w aspekcie praktycznego ich zastosowania gdyż potwierdzają, że klamry wywołują stałą siłę w długim zakresie czasowym co jest niezbędne w leczeniu złamań.

W dalszym etapie stworzono model geometryczny klamry do osteosyntezy wykorzystując moduł ANSYS DesignModeler, który w konsekwencji dotyczył połowy klamry ze względu na jej symetrię, co pozwoliło to na ograniczenie liczby obliczeń. W zakresie modelowania naprężeń zredukowanych pojawiających się w klamrach wykorzystano zredukowane naprężenie von Misesa będące liczbą w przeciwieństwie do klasycznych naprężeń, które są tensorami co w konsekwencji bardzo ułatwia analizę i interpretację wyników. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano wartości siły ściskającej F_s , wywieranej przez ramiona klamry na kość oraz rozkład naprężeń wewnątrz klamry. Uzyskane dane w wyniku modelowania poddano analizie statystycznej wyznaczając szereg histogramów ułatwiających interpretację wyników. Zaobserwowano, że wraz ze zmniejszeniem długości przęsła następuje wzrost siły z jaką klamra oddziałuje na kość. Wyniki modelowania były zbliżone do pomiarów eksperymentalnych, ich rozbieżności można tłumaczyć zastosowaniem mniejszej ilości elementów skończonych dostępnych w użyтым oprogramowaniu. Analiza wyników modelowania rozkładu naprężeń zredukowanych w klamrach w odniesieniu do zakresu naprężeń charakterystycznych przemian fazowych σ_s^{AS} , σ_f^{AS} , σ_s^{SA} , σ_f^{SA} w zakresie supersprężystym określonych w testach rozciągania wykazała, że w klamrach występuje niejednorodny rozkład naprężeń, występują obszary o naprężeniach z zakresu plateau na krzywej $\sigma(\varepsilon)$, klamry mogą wykazywać korzystne z punktu widzenia zastosowań medycznych właściwości supersprężyste, jednakże tylko w ich małej objętości (4,9-18,6%) występuje efekt supersprężysty. Dlatego też, podjęto dalsze prace modelowania nowych klamer w celu zwiększenia tego udziału. Sprowadziły się one do zmniejszenia kąta pomiędzy osiami przęsła i ramion, co powinno doprowadzić do większej deformacji materiału klamry i wzrostu poziomu naprężeń. Podejście to okazało się skuteczne gdyż uzyskano od pięcio- do

trzydziestoprocentowego wzrostu objętości klamry, w której występuje efekt supersprężysty. Również zaobserwowano wzrost objętości klamry o naprężeniach większych od σ_s^{SA} (górną granicę zakresu supersprężystości na dolnym plateau $\sigma(\epsilon)$), co stanowi tzw. „rezerwę supersprężystości” co jest korzystne z punktu widzenia klinicznego zastosowania klamer. Jedynym wyjątkiem była klamra o długości 10,3 mm, w której zmiana kąta podgięcia o zaledwie jeden stopień powoduje ponad pięćdziesięcioprocentowy wzrost objętości pożądanej fazy, ze względu na największe gradienty naprężenia. Jednak ten wynik może być obarczony błędem ze względu na niewydolność zastosowanego pakietu obliczeniowego. Ostatnim krokiem przy modelowaniu nowej klamry było obniżenie siły jej oddziaływania na kość, która wzrosła w wyniku wzrostu naprężeń wraz ze zmianą kąta pomiędzy osiami przęśla i ramion. W tym celu zaproponowano zmniejszenie średnicy klamry począwszy od średnicy wyjściowej 1,3 mm co 0,01 mm aż do momentu uzyskania siły ściskającej równej sile początkowej. Modelowanie pozwoliło na określenie średnicy klamry równej 1,23 mm, dla której wartość siły oddziaływania klamry różni się o mniej niż jeden procent od siły pierwotnej. **W konsekwencji w wyniku modelowania MES przedstawiono geometryczne wartości klamer (długość przęśla, średnica, kąt podgięcia) dla dwóch typoszeregów, w których objętości występuje największy udział efektu supersprężystego (Tabela 18), co należy uznać za najważniejsze osiągnięcie recenzowanej pracy.** W ostatnim rozdziale w części eksperymentalnej przedstawiono kontrolę procesu analizy numerycznej. Polegało to na korelowaniu wyników obliczeń numerycznych z ilością wykorzystanych węzłów. Stwierdzono, że w niektórych przypadkach występują skokowe zmiany badanych właściwości wraz ze skokową zmianą ilości węzłów, co można uznać za błąd analizy numerycznej wynikający z zastosowania nieodpowiedniego oprogramowania.

Ocena edytorska pracy

Przedstawiona rozprawa została przygotowana w sposób przejrzysty, jest napisana przystępnym językiem z czytelnymi wykresami i rysunkami. Jednakże, praca nie posiada oddzielnego rozdziału zawierającego dyskusję wyników modelowania i przeprowadzonych eksperymentów, lecz wszystko zostało zawarte w jednym rozdziale 7 zatytułowanym „Część eksperymentalna”, po którym następują bardzo ogólne wnioski (rozdział 8), stwarzając wrażenie, że praca jest niedokończona. Biorąc pod uwagę klasyczne artykuły naukowe, część eksperymentalna zazwyczaj dotyczy opisu badanego materiału, jego różnorodnej obróbki oraz metod badawczych użytych do jego charakterystyki, po czym następują rozdziały dotyczące uzyskanych wyników i ich dyskusji. Jednakże, nie umniejsza to wartości pracy, gdyż podrozdziały zawarte w rozdziale 7 ułożone są logicznie i w miarę postępujących badań i etapów modelowania uzupełnione są o odpowiednią dyskusję uzyskanych wyników. W ostatnich rozdziałach pracy przedstawiono wyczerpujący spis publikacji, spis ilustracji i tabel oraz spis najważniejszych oznaczeń używanych w pracy oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Część ta zajmuje relatywnie dużą objętość pracy lecz w mojej opinii brak jest jakiegokolwiek informacji na temat osiągnięć publikacyjnych doktorantki związanych z niniejszą rozprawą, co często się praktykuje.

Spostrzeżenia i uwagi krytyczne

Należy zaznaczyć, że praca posiada relatywnie niewielką ilość błędów merytorycznych jak i niejasności. Jednakże, jak w większości rozpraw doktorskich można wskazać spostrzeżenia i uwagi krytyczne. Poniżej przedstawiam najważniejsze, które wynikły podczas recenzowania rozprawy.

1. W podrozdziale 7.1 przedstawiono wyniki statycznej próby rozciągania drutów NiTi. Jakkolwiek próba ta była przeprowadzona z dużą starannością i dokładnością, o czym poinformowano w rozprawie, rodzi się pytanie czy zastosowanie próbek o długości 100 mm i średnicy około 1mm, czyli bardzo smukłych (stosunek długości do średnicy około 100) nie powodowało wprowadzenia uzyskanych rozbieżności dla dwóch badanych średnic drutów chociażby ze względu na jakość powierzchni drutów na tak długim odcinku.
2. W podrozdziale 7.6 opisano proces rozciągania klamer w celu określenia sił odpowiadających maksymalnemu przemieszczeniu ramion klamer. W pierwszym etapie wykonane klamry nie wykazywały efektu supersprężystego, dlatego też poddano je odpowiedniej obróbce cieplnej. Rodzi się tutaj pytanie na jakiej podstawie zostały dobrane parametry obróbki cieplnej i co ona spowodowała, że efekt się pojawił?
3. W rozdziałach 7.6 i 7.7 stabelaryzowano (Tabele 13 i 14) wartości sił odpowiadających maksymalnemu przemieszczeniu ramion klamer oraz siły wywieranej przez ramiona klamry po czasie 15 minut od założenia klamry. W Tabelach tych po raz pierwszy z w tekście użyto numerów klamer, co wprowadza niejasność i nie odniesiono się, których typoszeregów dotyczą te wyniki. Jeśli dotyczą tylko jednego typoszeregu, to skąd biorą się tak duże rozbieżności siły w zakresie od 10 do 17 N (Tabela 14)?
4. Zestaw parametrów użytych do modelowania przedstawiono w Tabeli 16, zastanawia dlaczego dla typoszeregu klamer o średnicy 1,4 i 1,5 mm, do modelowania przyjęta została średnica taka sama średnica $D_I = 1,3$ mm, i czy to nie wpływa na wiarygodność otrzymanych wyników modelowania?
5. Modelowanie MES pozwoliło na zaproponowanie wymiarów geometrycznych klamry o najlepszych właściwościach supersprężystych, jednakże nie potwierdzono tego eksperymentalnie poprzez wytworzenia takiej klamry i jej przebadanie. Co było powodem nie wykonania takich badań?

Wszystkie powyższe uwagi mają charakter ściśle dyskusyjny i nie wpływają na pozytywne całokształt przedłożonej rozprawy.

Wniosek końcowy

W podsumowaniu należy stwierdzić, że Pani mgr inż. Beata CHRZAŚCZ przedłożyła interesującą pracę doktorską dotyczącą zastosowania modelowania metodą elementów skończonych do optymalizacji właściwości klamer do osteosyntezy wykonanych ze stopów NiTi wykazujących efekt supersprężysty. Jak wspomniałem w wstępie recenzji tematyka rozprawy łączy trzy dziedziny nauki tj. modelowanie numeryczne oparte na matematyce, medycynę oraz inżynierię materiałową, co czyni ją niezwykle aktualną w aspekcie naukowym i atrakcyjną w aspekcie aplikacyjnym. Wykonane badania eksperymentalne i modelowanie pozwoliły na osiągnięcie założonego celu i udowodnienie założonej tezy, tzn. określono parametry geometryczne klamer posiadające najlepsze właściwości supersprężyste do

zastosowań w leczeniu złamań kości. Doktorantka wykazała się wnikliwą interpretacją uzyskanych wyników zarówno eksperymentalnych jak i modelowania oraz przeprowadziła krytyczną dyskusję błędów mogących pojawić się podczas modelowania.

Mając na względzie powyższe stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim na stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych z zakresu inżynierii materiałowej, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych i wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr. inż. Beaty CHRZĄSZCZ do publicznej obrony przed Radą Naukową Instytutu Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach.



Dr hab. inż. Wojciech Maziarz, prof. PAN

Wpłynęło 05.02.2021r.