TECHNIKA TRANSPORTU SZYNOWEGO

Roman KRÓL

OPTYMALIZACJA KSZTAŁTU ZĘBÓW BIMETALICZNYCH PIŁ TAŚMOWYCH DO DREWNA

Streszczenie

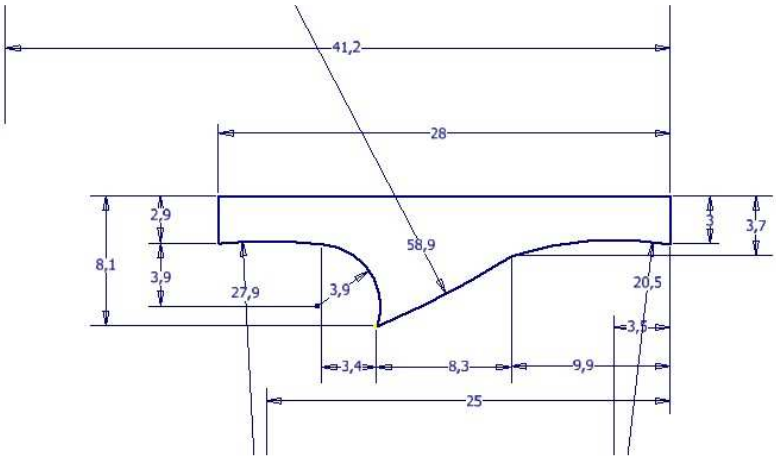
W artykule przedstawione zostały rezultaty optymalizacji kształtu zębów bimetalicznych pił taśmowych do drewna. Rezultaty uzyskane zostały przy pomocy programu do optymalizacji konstrukcji Altair OptiStruct, który wykorzystuje metodę elementów skończonych. Porównane zostały wyniki uzyskane dla dwóch różnych kształtów zęba. Optymalne rozwiązanie odznacza się mniejszymi wartościami maksymalnych naprężeń zredukowanych spowodowanych siłą oporu skrawania.

WSTĘP

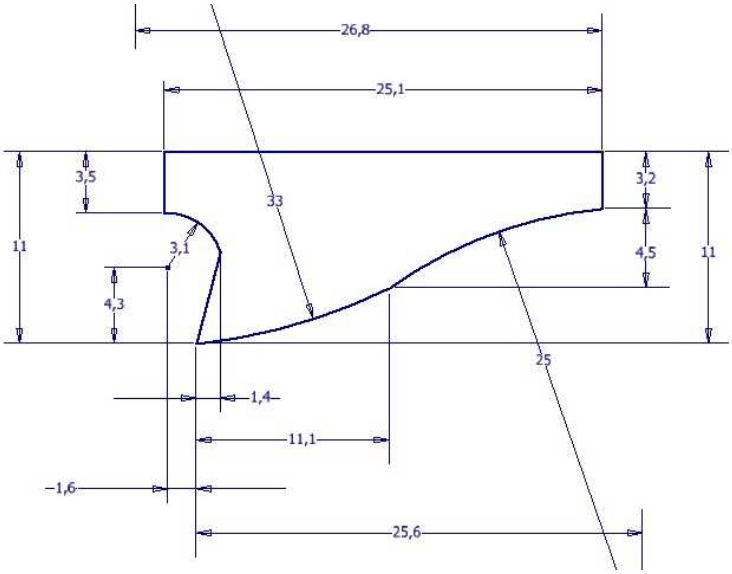
Obiektem badań były dwa typy zębów pił taśmowych, przedstawione i zwymiarowane na rys. 1 i 2. Piły wykonane są z dwóch rodzajów materiałów: stali szybkotnącej i stali sprężynowej (rys.3). Taśma wraz z fragmentem zęba wykonana jest ze stali sprężynowej aby zapewnić elastyczność przy odpowiednio wysokiej granicy plastyczności. Część skrawająca zęba piły wykonana jest ze stali szybkotnącej, aby zapewnić lepszą trwałość przy wysokiej doraźnej wytrzymałości na rozciąganie R_m=830 MPa. Grubość taśmy badanych pił bimetalicznych wynosi 1,1 mm. Parametry materiałowe przedstawione zostały w tab.1.

Celem optymalizacji było znalezienie takiego kształtu zęba piły, przy którym maksymalne naprężenia zredukowane byłyby niższe od tych w wyjściowym modelu. Optymalizację przeprowadzono dla różnych kierunków siły skrawania. Oprócz obciążeń występujących w płaszczyźnie zęba piły uwzględniono także siłę powodującą zginanie, skierowaną prostopadle do płaszczyzny taśmy.

Proces optymalizacji oparty jest o metodę elementów skończonych. Analizę wykonano w programie Altair OptiStruct [1].



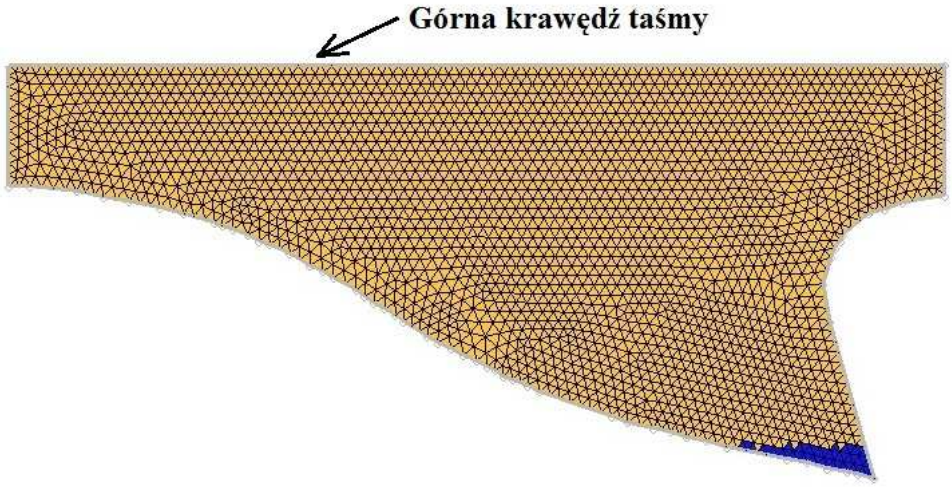
Rys. 1. Wymiary zęba piły taśmowej pierwszego typu, przed optymalizacją



Rys. 2. Wymiary zęba piły taśmowej drugiego typu, przed optymalizacją

Tab. 1. Parametry materiałowe zębów pił pierwszego i drugiego typu przedstawionych na rys. 1 i 2

	Stal sprężynowa 60S2 [2]	Stal szybkotnąca P9 [2]
Moduł Younga [MPa]	215000	220000
Granica plastyczności [MPa]	1093	450
Doraźna wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1275	830
Moduł Kirchhoffa [MPa]	82000	83000
Gęstość [kg/m^3]	7680	8300
Liczba Poissona	0.31	0.33

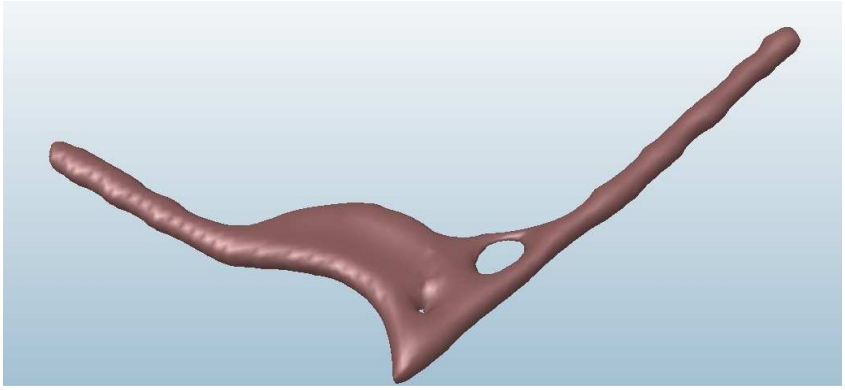


Rys. 3. Ząb piły taśmowej do drewna. Kolorem jasnym oznaczony został fragment wykonany ze stali sprężynowej. Ciemny kolor oznacza fragment wykonany ze stali szybkotnącej

Na potrzeby optymalizacji model piły został ograniczony do jednego zęba oraz niewielkiego fragmentu taśmy. W piłach do drewna naprężenia w pobliżu górnej krawędzi taśmy (rys.3) są pomijalnie małe, co pozwala na usunięcie z modelu tego fragmentu taśmy. Inaczej wygląda sytuacja w piłach do metalu, gdzie z uwagi na duże naprężenia w pobliżu górnej krawędzi taśmy stosuje się pasek wzmacniający zapobiegający powstawaniu pęknięć.

1. INFORMACJE O PROCESIE OPTYMALIZACJI

Na rys. 3. przedstawiony został model piły drugiego typu podzielony na czworościenne, trójwymiarowe elementy skończone *(ang. tetrahedral finite element)* wygenerowane w programie Altair HyperMesh. Były wykonane następujące rodzaje optymalizacji: optymalizacja topologii (*ang. topology optimization*), optymalizacja topograficzna (*ang. topography optimization*) oraz optymalizacja kształtu *(ang. free shape optimization).* Optymalizacja topologii wykonana za pomocą programu OptiStruct z technologicznego punktu widzenia nie dała pożądanych rezultatów. Kształt zęba uzyskany w wyniku tej optymalizacji nie nadaje się do użytku (rys. 4). Optymalizacja topologii wykonana dodatkowo w programie solidThinking Inspired dała jedynie informację o tym, w którym miejscu piły taśmowej można wykonać otwór chłodzący. Wyniki optymalizacji topologicznej przedstawione zostały na rys. 4. Warunki brzegowe dla tego typu optymalizacji są takie same jak warunki opisane w rozdziale 2.



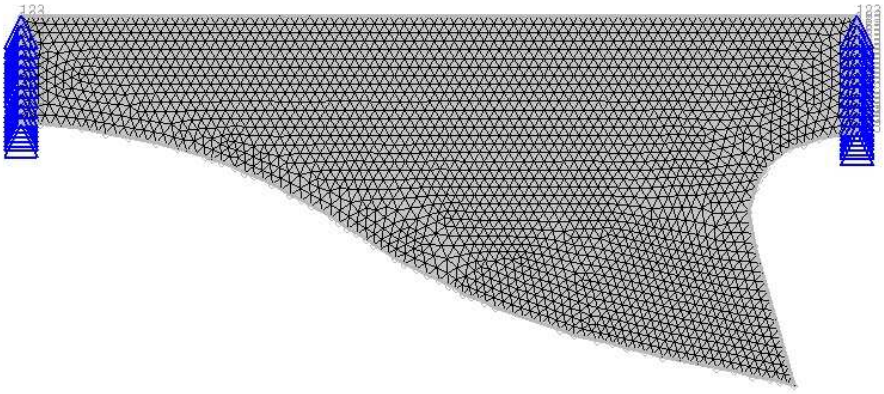
Rys. 4. Wynik optymalizacji topologii zęba piły pierwszego typu (rys.1) uzyskany w programie solidThinking Inspired

Podczas prób przeprowadzenia optymalizacji topograficznej nie udało się uzyskać wystarczająco dyskretnych rozwiązań. Ten rodzaj optymalizacji nie dał użytecznych z technologicznego punktu widzenia rozwiązań z uwagi na to, że zmienna grubość taśmy może powodować dodatkowe opory cięcia oraz zakleszczanie się piły.

Użyteczne z praktycznego punktu widzenia rezultaty uzyskane zostały po przeprowadzeniu optymalizacji kształtu zęba piły. Zostały one przedstawione w rozdziale 3.

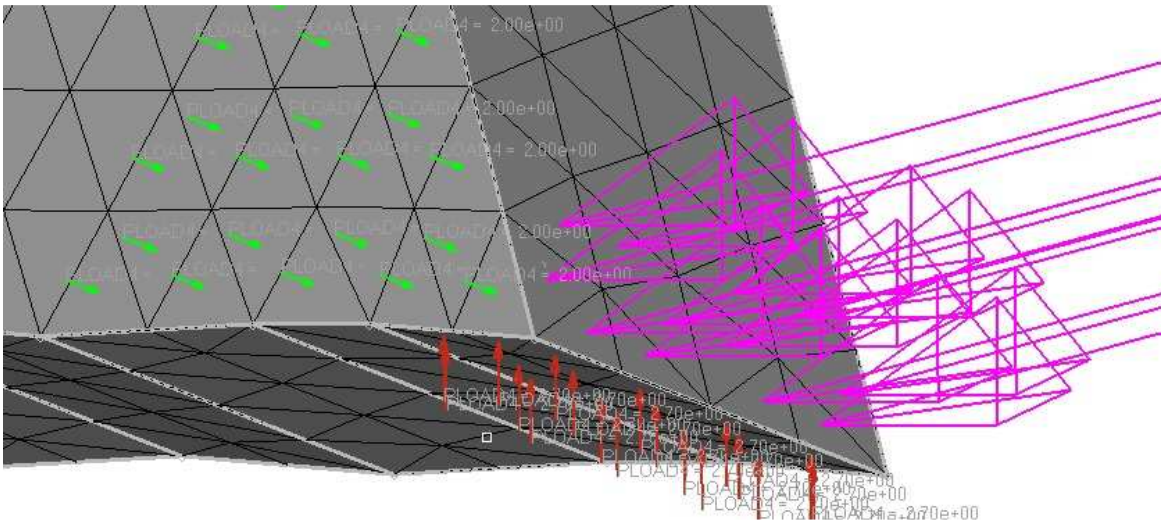
2. WARUNKI BRZEGOWE

Obydwa typy optymalizowanych zębów pił posiadają zablokowane translacyjne stopnie swobody w miejscach oznaczonych niebieskimi trójkątami na rys.5.



Rys. 5. Warunki brzegowe dla zęba piły drugiego typu. Niebieskimi trójkątami oznaczone zostały węzły z zablokowanymi translacyjnymi stopniami swobody. W analogiczny sposób zostały przyłożone warunki brzegowe do zęba piły pierwszego typu

Dla optymalizowanych zębów pił zostały zdefiniowane trzy stany obciążenia *(ang. loadsteps):* LoadStepHor (zawiera siłę działającą wzdłuż dłuższego boku taśmy, w jej płaszczyźnie), LoadStepVer (zawiera siłę dociskającą taśmę do skrawanego materiału, skierowaną prostopadle do dłuższego boku taśmy i działającą w płaszczyźnie taśmy) oraz LoadStepZ (zawiera siłę powodującą zginanie piły, skierowaną prostopadle do płaszczyzny taśmy). Wszystkie siły przyłożone zostały w postaci ciśnień do wierzchołka zęba wykonującego proces skrawania materiału. Siły obciążające ząb piły przedstawione zostały na rys. 6.



Rys. 6. Trzy wzajemnie ortogonalne obciążenia ciśnieniem działające na ząb piły. Fioletowym kolorem oznaczono stan obciążenia LoadStepHor zawierający siłę w kierunku posuwu, czerwonym - stan obciążenia LoadStepVer zawierający siłę dociskającą ząb piły do skrawanego materiału, zielonym - stan obciążenia LoadStepZ zawierający siłę powodującą zginanie taśmy

Optymalizacja przeprowadzona została dla różnych kątów, jakie tworzy siła skrawania z kierunkiem posuwu. Wartości składowych siły skrawania działających w płaszczyźnie taśmy piły zostały przedstawione w tab.2.

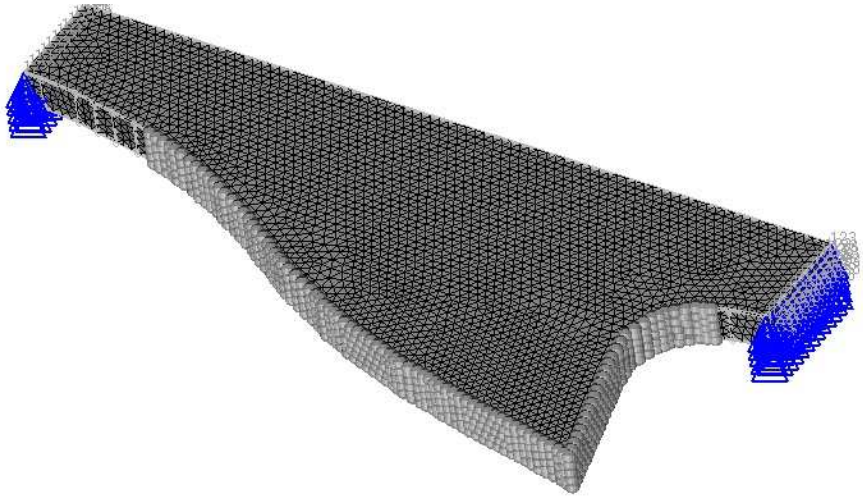
Tab. 2. Składowe siły skrawania działające w płaszczyźnie taśmy w zależności od kąta między kierunkiem siły skrawania a kierunkiem posuwu

α – kąt między kierunkiem siły skrawania a kierunkiem posuwu [°]	Składowa siły skrawania w kierunku posuwu [N] (st. obciążenia LoadStepHor)	Składowa siły skrawania w kierunku odporowym [N] (st. obciążenia LoadStepVer)
0	130	0
5	129	11
10	128	23
15	125	34
20	122	44
25	118	55
30	113	65
35	106	75
40	100	84
45	92	92
50	84	100
55	75	106

Dane znajdujące się w tab. 2 zostały ustalone na podstawie parametrów geometrycznych optymalizowanych pił oraz danych przedstawionych w [3] i [4]. Na podstawie [3] ustalono proporcję siły w kierunku posuwu oraz odporowym. Publikacja [4] zawiera natomiast dane dotyczące wartości sił podczas cięcia drewna (na przykładzie klonu). Wartość siły zginającej wynosi 50 N i jest stała niezależnie od kąta α. Wartość siły wypadkowej w płaszczyźnie taśmy (w kierunku odporowym i w kierunku posuwu) wynosi na podstawie danych z [4] 130N.

3. REZULTATY UZYSKANE W WYNIKU OPTYMALIZACJI KSZTAŁTU ZĘBÓW PIŁ TAŚMOWYCH

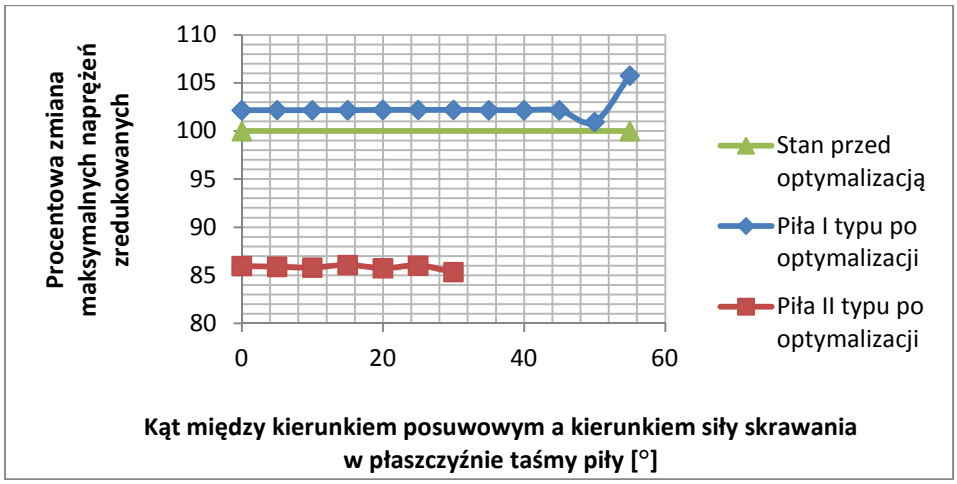
Jako zmienną projektową dla optymalizacji kształtu wybrano powierzchnię przedstawioną na rys. 7. Jako odpowiedź funkcji celu zostało wybrane pole naprężeń w optymalizowanym modelu. Celem optymalizacji była minimalizacja maksymalnych naprężeń w zębie piły i fragmencie taśmy (rys. 3, 7).



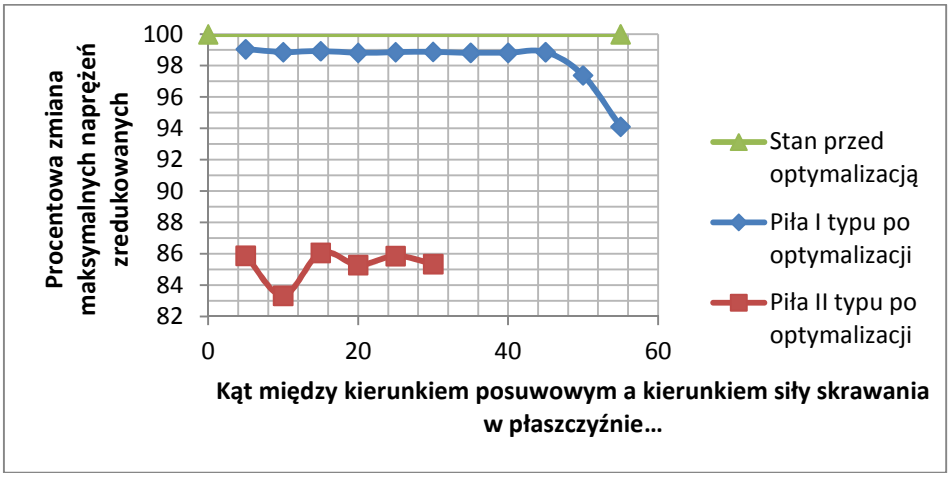
Rys. 7. Powierzchnia piły taśmowej podlegająca modyfikacji (jako zmienna projektowa) w procesie optymalizacji kształtu zęba piły taśmowej do drewna. Szarymi sferami oznaczone zostały węzły znajdujące się na modyfikowanych powierzchniach

Dla różnych kierunków siły skrawania, według tab. 2 przeprowadzono dwa niezależne procesy optymalizacyjne. W pierwszym procesie powierzchnia zmiennej projektowej została wybrana jak na rys. 7, a optymalizacja była przeprowadzona z opcją *unconstrained* (bez ograniczeń). W drugim procesie węzły leżące na powierzchniach oznaczonych sferami na rys. 7 zostały podzielone między dwie odrębne zmienne projektowe. Jedna ze zmiennych związana jest z powierzchnią przy kącie przyłożenia, druga z powierzchnią przy kącie natarcia. Pierwsza z wymienionych zmiennych została utworzona z ustawioną opcją kierunku na *shrink* (kurczenie się) a druga z opcją *grow* (wzrost). Współczynnik zaburzeń (*initial perturbation factor*) został dla pierwszego procesu optymalizacji ustawiony na wartość 0.5 a dla drugiego na wartość 5.

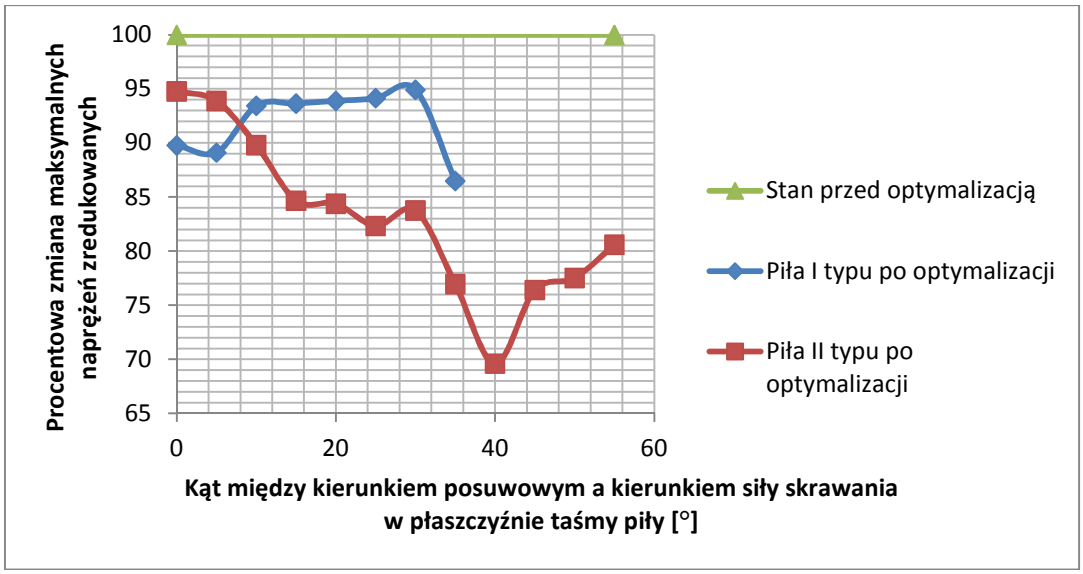
Na rys. od 8 do 10 przedstawiona została procentowa zmiana maksymalnych naprężeń zredukowanych w stosunku do stanu przed optymalizacją dla dwóch typów pił taśmowych. Przedstawiono rezultaty dla stanów obciążenia LoadStepHor oraz LoadStepVer w pierwszym procesie optymalizacji oraz dla stanu obciążenia jedną siłą w drugim procesie optymalizacji.



Rys. 8. Procentowa zmiana maksymalnych naprężeń zredukowanych w modelu piły I i II typu po pierwszym procesie optymalizacji (bez ograniczeń) w stosunku do wartości przed optymalizacją dla stanu obciążenia LoadStepHor

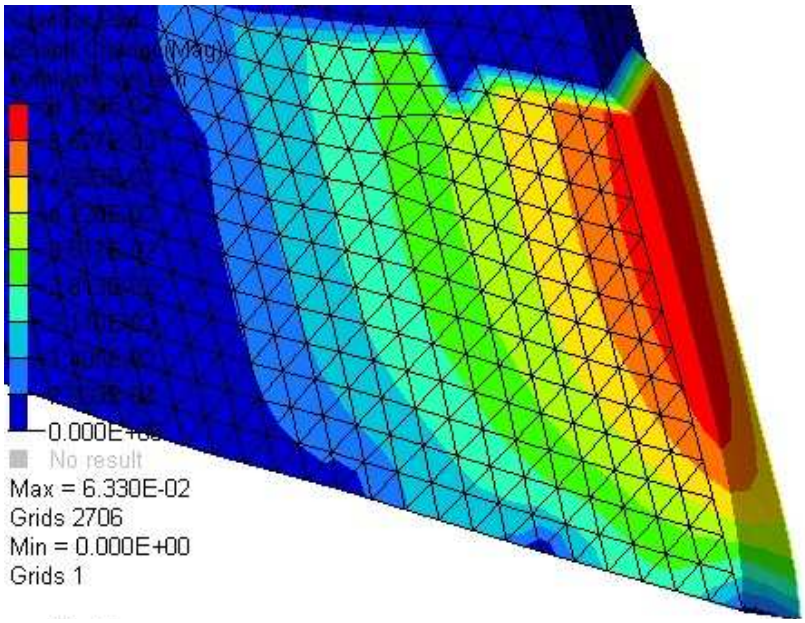


Rys. 9. Procentowa zmiana maksymalnych naprężeń zredukowanych w modelu piły I i II typu po pierwszym procesie optymalizacji (bez ograniczeń) w stosunku do wartości przed optymalizacją dla stanu obciążenia LoadStepVer

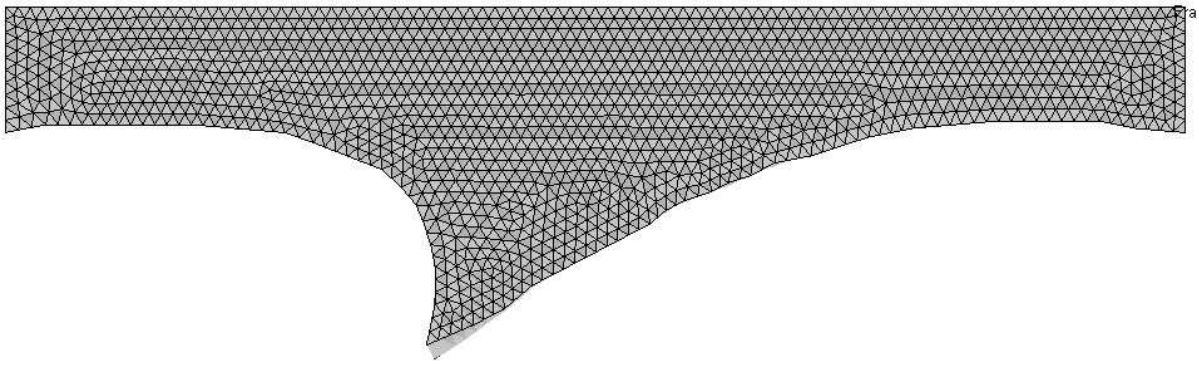


Rys. 10. Procentowa zmiana maksymalnych naprężeń zredukowanych w modelu piły I i II typu po drugim procesie optymalizacji (z dwiema zmiennymi projektowymi) w stosunku do wartości przed optymalizacją dla jednego stanu obciążenia

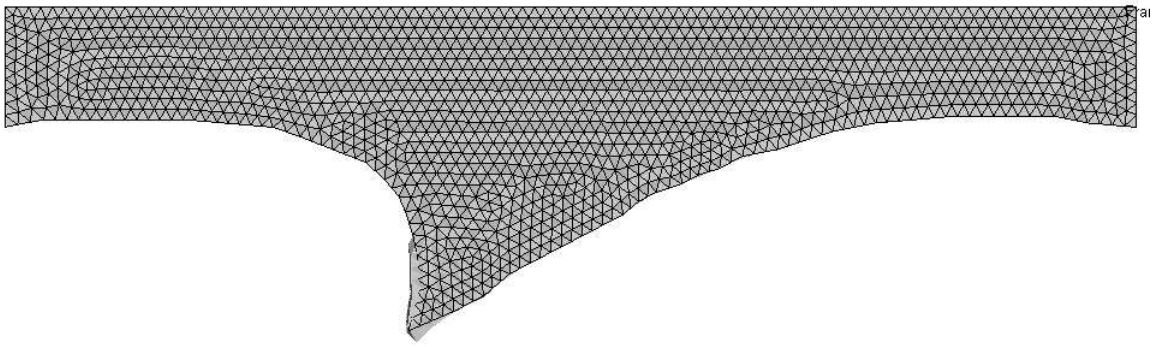
Na rys. od 11 do 16 przedstawione zostały wybrane rezultaty optymalizacji kształtu pił taśmowych pierwszego i drugiego typu. Czarnymi liniami oznaczona została siatka elementów skończonych przed procesem optymalizacji. Na rys. 11 kolorami oznaczone zostały obszary o różnych wartościach przesunięcia węzłów siatki elementów skończonych w stosunku do stanu przed optymalizacją.



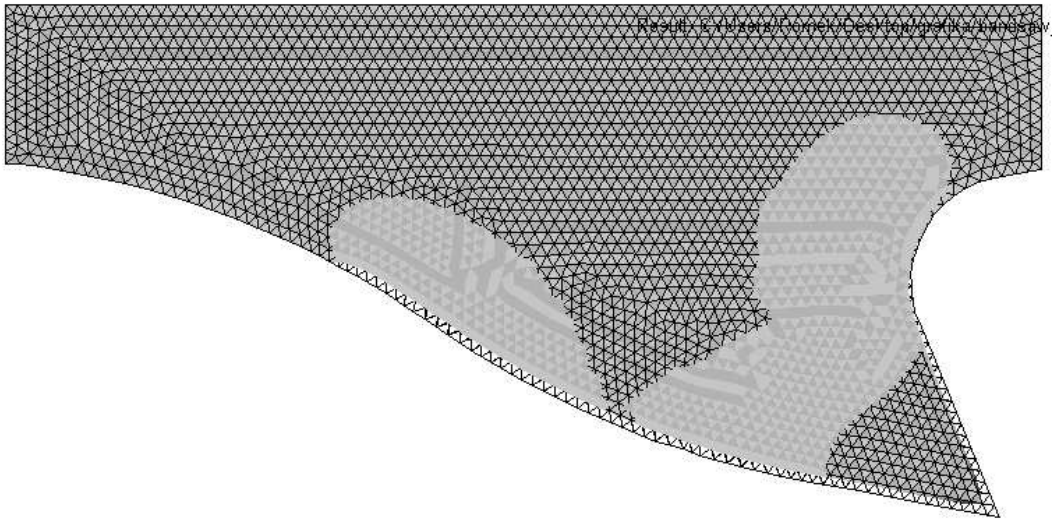
Rys. 11. Rezultat optymalizacji zęba piły taśmowej II typu po obciążeniu siłą w kierunku posuwu. Czarnymi liniami oznaczony jest kształt piły (elementy skończone) przed procesem optymalizacji drugiego typu (z dwiema zmiennymi projektowymi). Na rysunku widoczny jest przyrost materiału po stronie kąta przyłożenia



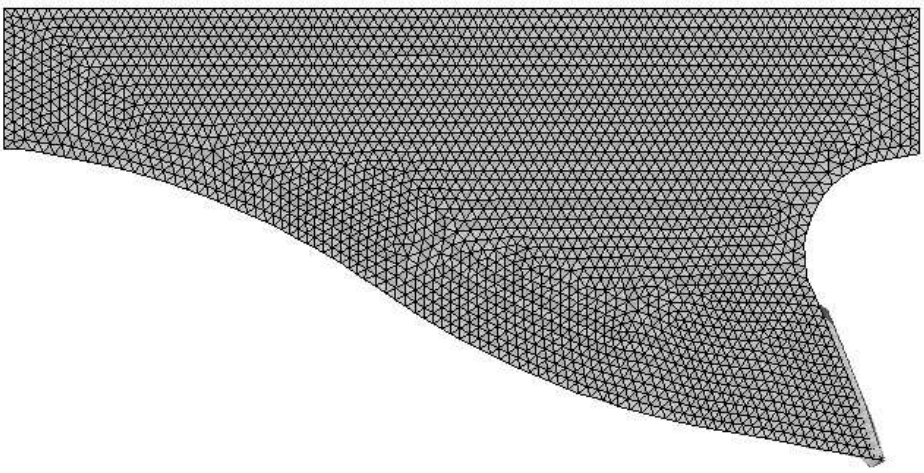
Rys. 12. Rezultat optymalizacji piły taśmowej I typu w drugim procesie optymalizacji dla kąta 5° między kierunkiem siły skrawania w płaszczyźnie taśmy a kierunkiem posuwu. Czarnymi liniami oznaczona została siatka elementów skończonych zęba przed optymalizacją



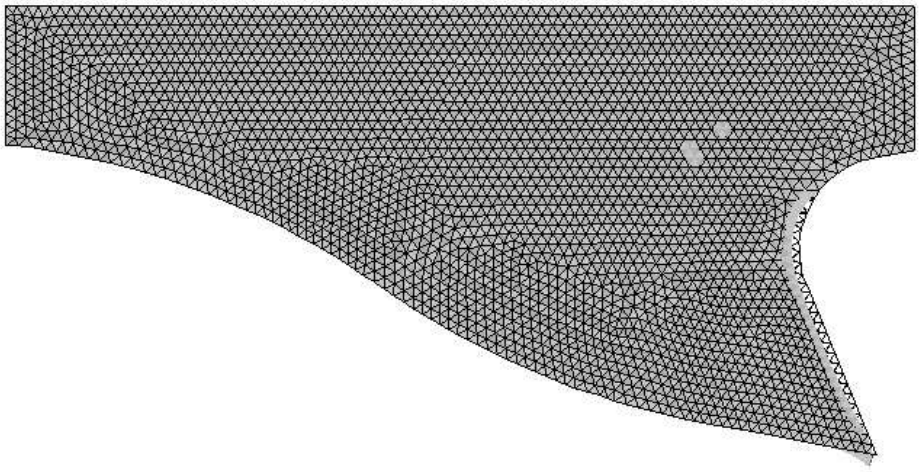
Rys. 13. Rezultat optymalizacji piły taśmowej I typu w drugim procesie optymalizacji dla kąta 35° między kierunkiem siły skrawania w płaszczyźnie taśmy a kierunkiem posuwu. Czarnymi liniami oznaczona została siatka elementów skończonych zęba przed optymalizacją



Rys. 14. Rezultat optymalizacji piły taśmowej II typu w pierwszym procesie optymalizacji dla kąta 10° między kierunkiem siły skrawania w płaszczyźnie taśmy a kierunkiem posuwu. Czarnymi liniami oznaczona została siatka elementów skończonych zęba przed optymalizacją



Rys. 15. Rezultat optymalizacji piły taśmowej II typu w drugim procesie optymalizacji dla kąta 40° między kierunkiem siły skrawania w płaszczyźnie taśmy a kierunkiem posuwu. Czarnymi liniami oznaczony został kształt przed optymalizacją



Rys. 16. Rezultat optymalizacji piły taśmowej II typu w drugim procesie optymalizacji dla kąta 55° między kierunkiem siły skrawania w płaszczyźnie taśmy a kierunkiem posuwu. Czarnymi liniami oznaczona została siatka elementów skończonych zęba przed optymalizacją

PODSUMOWANIE

Rezultaty przedstawione na rys. 8 – rys. 11 świadczą o tym, że w zębie piły taśmowej II typu po procesie optymalizacji występuje większy spadek maksymalnych naprężeń zredukowanych niż w zębie piły I typu. Maksymalne naprężenia zredukowane w pile II typu po procesie optymalizacji zmniejszyły się do 83-86% wartości przed optymalizacją, podczas gdy w pile I typu nastąpiło zmniejszenie maksymalnych naprężeń zredukowanych do 94% wartości przed optymalizacją (dla siły skrawania pochylonej pod kątem mniejszym od 45° do kierunku posuwu).

Rezultaty przedstawione dla stanów obciążenia LoadStepHor oraz LoadStepVer wykazały, że piła I typu jest bardziej wrażliwa na obciążenia poprzeczne niż na obciążenia wzdłuż taśmy. Wartość naprężeń w zoptymalizowanym modelu piły I typu maleje gwałtownie po przekroczeniu przez siłę skrawania kąta 45°.

Na rys. 11 można zaobserwować znaczący przyrost materiału po stronie kąta przyłożenia. Drugi proces optymalizacji, w którym podzielono modyfikowaną powierzchnię pomiędzy dwie zmienne projektowe o różnych parametrach dotyczących kierunku zmian kształtu, daje

większe wartości modyfikacji kształtu zębów pił. Także w przypadku tego procesu optymalizacji zaobserwowane zostało znaczące zmniejszenie się maksymalnych naprężeń dla piły II typu.

Należy także zaznaczyć, że podczas pierwszego procesu optymalizacji (bez ograniczeń) rezultaty optymalizacji piły II typu dla kąta pochylenia siły skrawania powyżej 30° dawały w rezultacie siatki zawierające osobliwości. W drugim procesie optymalizacyjnym dla piły I typu, dla kąta siły skrawania o wartości ponad 35° pojawiły się błędy numeryczne związane z wygładzaniem *(ang. smoothing errors)*.

SHAPE OPTIMIZATION OF BIMETALLIC BAND SAWS TEETH FOR WOOD CUTTING

Abstract

This article presents the shape optimization results of the bimetallic band saws teeth for wood cutting. The results were obtained using the Altair OptiStruct software for structural optimization, which uses the finite element method. Two different types of band saw tooth have been optimized and compared. Optimal solution have lower value of the maximum von Mises stress due to cutting resistance force than tooth with initial shape.

BIBLIOGRAFIA

1. Altair, www.altairhyperworks.com, Program do optymalizacji konstrukcji Altair OptiStruct
2. Зубченко А.С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. и др. *Марочник сталей и сплавов* Москва, „Машиностроение”, издательство „Машиностроение-1”, 2003 w publikacji stal 60S2 oznaczona jest jako 60C2
3. Storch Borys *Podstawy obróbki skrawaniem*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2001
4. Iris Vazquez-Cooz, Robert W. Meyer, *Cutting forces for tension wood and normal wood of maple*, XII World Forestry Congres, Quebec City, Canada, 2003

Autor:
mgr inż. Roman KRÓL – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu