mgr inż. Roman Król

PRACA DOKTORSKA

"Modelowanie wytężenia i prognozowanie trwałości zmęczeniowej pił taśmowych z uwzględnieniem naprężeń własnych powstałych w procesie produkcji"

Streszczenie

Inżynieria pił taśmowych do drewna jest bardzo aktualnym, wartościowym i potrzebnym działem techniki, który warunkuje rozwój przemysłu drzewnego. Obecnie niewiele publikacji porusza temat zastosowań metody elementów skończonych w inżynierii pił taśmowych. Jest także mało eksperymentalnych prac związanych z pomiarami sił skrawania podczas cięcia drewna. Praktycznie brak jest prac poświęconych pomiarom sił podczas cięcia piłami taśmowymi polskich gatunków drewna. Optymalizacja kształtu, która może być zastosowana w inżynierii pił taśmowych także jest nie rozwinięta i wymaga dalszych prac.

Głównym celem pracy była analiza wpływu czynników strukturalnych oraz technologicznych na warunki obciążenia, odkształcenia, naprężenia, trwałość zmęczeniową i stateczność pił taśmowych. Wśród czynników strukturalnych rozpatrywane były: wymiary geometryczne piły taśmowej, geometria zęba, metoda prowadzenia piły na kołach prowadzących, stosunek grubości piły do średnicy koła prowadzącego, napięcie wstępne oraz odległość momentów skręcających piłę od kół prowadzących. Wśród czynników technologicznych rozpatrywane były: siły działające na walec spęczający, prędkość narzędzi spęczających, rozkład naprężeń własnych w zębie piły taśmowej oraz lokalizacje, w które może uderzać walec spęczający.

Analizy zostały wykonane przy użyciu symulacji numerycznych bazujących na metodzie elementów skończonych. Wykonane zostały także pomiary eksperymentalne sił skrawania działających na zęby piły taśmowej w czasie cięcia drewna sosnowego, lipowego oraz dębowego.

Analiza stanu obciążenia pił taśmowych wykazała, że najbardziej niebezpieczne dla trwałości pił taśmowych są: skręcanie oraz zginanie na kołach prowadzących. Niewłaściwie dobrany stosunek grubości piły taśmowej do średnicy koła prowadzącego oraz zbyt mała odległość momentów skręcających piłę taśmową od kół prowadzących mogą prowadzić do powstawania pęknięć zmęczeniowych w piłach. Najmniejsze naprężenia pojawiają się po obciążeniu momentem napędowym oraz siłą odśrodkową.

Krytyczne wartości sił odporu obliczone zostały na podstawie teorii zwichrzenia belek. Niewłaściwie dobrane wymiary geometryczne piły taśmowej do gatunku ciętego drewna mogą spowodować utratę stateczności, zsuwanie się piły z kół prowadzących a także jej pękanie. Niestateczna piła taśmowa powoduje powstawanie wzoru tarki (ang. washboarding patterns), co wymaga dodatkowej obróbki powierzchniowej po cięciu drewna. Największa siła odporu powstaje podczas cięcia drewna jesionowego oraz dębowego. Na podstawie przeprowadzonych analiz stateczność piły poprawia się wraz ze wzrostem jej grubości oraz szerokości. Korzystne jest umieszczenie siły odporu blisko kół prowadzących o ile nie

prowadzi to do zsuwania się piły z kół prowadzących. Zwiększanie długości czynnej piły taśmowej oraz prędkości skrawania prowadzi do pogorszenia się stateczności.

W pracy wykonana została analiza modalna z uwzględnieniem napięcia wstępnego piły taśmowej jako czynnika mającego wpływ na podstawowe częstości własne. Rezultaty uzyskane z obliczeń MES porównane zostały z rezultatami uzyskanymi z równania struny, uwzględniającego wzdłużny ruch piły taśmowej. Z analizy wynika, że zmieniając napięcie wstępne można zbliżać lub odsuwać wybrane częstości własne od strefy rezonansu. Przy małej prędkości skrawania, podstawowe częstości własne uzyskane z analizy MES są bliskie podstawowym częstościom własnym uzyskanym z równania struny. Przy większej prędkości skrawania (od 40 m/s do 80 m/s) staje się widoczny jej wpływ na podstawowe częstości własne.

W pracy poruszone zostały zagadnienia związane z powstawaniem oraz właściwościami naprężeń własnych. Wyznaczone zostały rozkłady naprężeń własnych po spęczaniu zębów pił taśmowych. Operacja spęczania zębów powoduje odkształcenia plastyczne, które prowadzą do powstawania naprężeń własnych po cofnięciu się narzędzi spęczających. W celu analizy procesu spęczania zębów pił taśmowych, wykonana została nieliniowa analiza MES w programie MSC Marc. Wynika z niej, że spęczanie zębów pił taśmowych w okolicy dna wrębu jest bardziej korzystne niż spęczanie zębów w wierzchołku z uwagi na korzystniejszy rozkład naprężeń własnych w pierwszej z wymienionych operacji. Korzystne jest także spęczanie z małą prędkością narzędzia spęczającego, gdyż powstają wtedy mniejsze naprężenia własne oraz mniejsze siły działają na narzędzie spęczające. Zaletą spęczania zęba w okolicy dna wrębu jest także to, że jego wierzchołek może być wielokrotnie ostrzony.

Autor wykonał analizy zmęczeniowe w oparciu o metodę elementów skończonych. Dwa modele MES zostały przeanalizowane. W modelu pierwszym występowało jedynie napięcie wstępne oraz zginanie na kołach prowadzących. W modelu drugim wprowadzono dodatkowo skręcanie piły taśmowej, a stosunek grubości piły taśmowej do średnicy kół prowadzących wybrany został w taki sposób aby zginanie na kołach prowadzących nie wpływało na trwałość zmęczeniową. W obu modelach została wyznaczona zależność trwałości zmęczeniowej od napięcia wstępnego, a w drugim modelu także zależność trwałości zmęczeniowej od odległości momentów skręcających piłę od kół prowadzących. Z analiz wynika, że piła taśmowa jest wrażliwa na odległość momentów skręcających od kół, ale także na stosunek jej grubości do średnicy koła prowadzącego. Niewłaściwe proporcje mogą znacznie obniżyć trwałość zmęczeniową piły.

Powszechnie stosowane metody optymalizacji strukturalnej (optymalizacja topologii, optymalizacja wymiarów geometrycznych) znajdują zastosowanie w optymalizacji struktur belkowych oraz prętowych. Są to jednak metody nieefektywne w zastosowaniu do pił taśmowych, gdzie zmieniany jest kształt zęba i niepożądane jest tworzenie się otworów wewnątrz jego geometrii. W pracy użyta została optymalizacja kształtu (ang. shape optimization) w celu wyznaczenia kształtu zęba o optymalnym rozkładzie naprężeń po obciążeniu siłą cięcia (składającą się z siły skrawania oraz siły odporu). Uzyskane rezultaty odznaczają się znacznym spadkiem maksymalnych naprężeń zredukowanych i bardziej równomiernym rozkładem naprężeń w okolicy wrębów. Rezultaty te mogą być pomocne w projektowaniu kształtów zębów pił taśmowych.

Informacja o wartościach sił działających na zęby piły taśmowej podczas cięcia drewna jest potrzebna w projektowaniu pił taśmowych i pilarek. Pozwala ona ustalić, w jaki sposób są obciążane części pilarki lub piła taśmowa w warunkach eksploatacji. Wartości sił skrawania różnią się pomiędzy gatunkami drewna. Firmy produkujące piły taśmowe powinny wykonać pomiary na docelowych gatunkach drewna, występujących w geograficznym regionie użytkowania piły taśmowej. Ostatnia polska publikacja wszechstronnie omawiająca tematykę pił była wydana w latach 60-tych ubiegłego stulecia. Technika pomiaru sił nie była wówczas tak różnorodna jak obecnie. W niniejszej pracy zaprojektowane i wykonane zostało oryginalne stanowisko pomiarowe złożone z czujników foliowych, układu elektronicznego Arduino UNO oraz komputera PC. Przygotowane zostały także do pomiaru formatki z drewna sosnowego, lipowego oraz dębowego. Siły skrawania okazały się większe podczas cięcia formatek lipowych niż sosnowych, co jest niezgodne z danymi literaturowymi (Orlicz T., *Obróbka drewna narzędziami tnącymi.* Wydanie IV poprawione i uzupełnione. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa 1988). Największe siły skrawania zarejestrowano podczas cięcia drewna dębowego, co jest zgodne z oczekiwaniami.

Rezultaty obliczeń i analiz przedstawione w pracy są nowe i mają znaczenie praktyczne istotne podczas projektowania i produkcji pił taśmowych. Wskazówki zawarte w pracy mogą poprawić efektywność cięcia drewna w tartakach. Mogą pomóc w opracowaniu oryginalnych i efektywnych kształtów zębów pił taśmowych, zredukować drgania, prognozować trwałość zmęczeniową, wybrać parametry technologiczne narzędzi przeznaczonych do automatycznego spęczania zębów. W pracy przeanalizowana została innowacyjna operacja spęczania zębów pił taśmowych w dnie wrębu, która jest bardzo obiecująca oraz może pomóc w projektowaniu bardziej statecznych pił taśmowych.

Roman Król

mgr inż. Roman Król

DOCTORAL THESIS

"Modeling of loading state and forecasting of fatigue life of band saw blades including the residual stresses arising in the production process"

Abstract

Wood band saw engineering is one of the current, valuable and necessary discipline, which determines the development of wood industry. Currently, very few works concern the areas of application the Finite Element Method (FEM) in the engineering of wood band saw. There is also very few experimental works concern measurement of cutting forces which arise during cutting on band saws Polish species of wood. Optimization problems applied in this discipline of engineering also requires development.

The main purpose of the work was to analyze the impact of structural and technological factors on load conditions, deformation, stress, fatigue life and stability of wood band saw. Among the structural factors, geometric parameters of the band saw, saw tooth geometry, method of guiding the band saw on the wheels, the ratio of band saw thickness to guiding wheel diameter, initial tension, distance from the twisting moments and guiding wheels were considered. Among the technological factors, forces acting on the upsetting tool, speed of these tools, residual stress distribution in the wood band saw tooth and the locations in which strikes upsetting cylinder were considered.

Analyses were performed using a numerical simulation based on the Finite Element Method and experimental measurements of the forces acting on the band saw tooth during cutting various species of wood.

Analysis of the band saw loading conditions showed that most dangerous for band saw life is bending on the guiding wheels and torsion. Improperly set ratio of thickness of the band saw to guiding wheels diameter and too short distance between twisting moments and guiding wheels can lead to fatigue cracks and breaking of band saw. The smallest stresses are introduced by the drive and centrifugal force load.

Critical values of feed force was calculated on the basis of theory of stability of beams. Improperly selected geometric dimensions of band saw can lead to loss of stability, slipping from the guiding wheels or cracking of band saw. Unstable band saw can generate washboarding patterns, which demands additional machining of cut wood. Highest feed forces arise during cutting ash and oak wood. Analysis showed that increase of band saw thickness and width lead to better stability. It is valuable to place the resulting feed force near to guiding wheels, but it can also lead to slipping band saw from the guiding wheels. Increase of band saw length and cutting speed deteriorating stability.

The modal analysis with load stiffening was also performed. Taking to account load stiffening gave possibility to determine influence of initial tension on natural frequencies. Results of the Finite Element Modal Analysis was compared to the analytical calculations based on the theory of string in longitudinal movement. Analysis showed that increase or decrease of initial tension can shift the natural frequency to or from the resonance area. For small cutting speeds (up to 40 m/s) natural frequencies obtained from the calculations based

on the Finite Element Method are close to analytical results from the string equation. For higher speeds (from 40 m/s to 80 m/s) influence of cutting speed on the natural frequencies is important and can't be neglected in the Finite Element Analysis.

In this work nature and origins of residual stresses was described. Distribution of residual stress was investigated in relation to swaging of wood band saw teeth. This technological operation results in plastic deformation which lead to formation of residual stresses in the band saw material when the swaging tools are released. To analyse the swaging operation, Nonlinear Finite Element Analysis was performed in the MSC Marc software. Analysis showed that swaging the tooth at the bottom of the gullet is more beneficial than swaging the tooth at the point, because of more safe residual stress distribution. It is also beneficial to swage the tooth with the low speed, because forces acting on the swaging bar are lower and lower residual stresses arise. When band saw tooth is swaged at the bottom of the gullet it can be sharpened many times, which can't be applied to the tooth swaged at the point.

In this work, fatigue analysis based on the FEM was performed. Two FEM models were analysed. In the first model only initial tension and bending on the guiding wheels was considered. This model didn't include twisting of band saw. In the second FEM model twisting of band saw was taken into account and the ratio of guiding wheel diameter to the band saw thickness was chosen to not influence the fatigue life of band saw. In both models fatigue life dependence on initial tension was determined and in the second model dependence of fatigue life on the distance between guiding wheels and twisting moments was considered. Analysis showed that improperly set ratio of guiding wheel diameter to the band saw thickness and improperly chosen distance between twisting moments and guiding wheels can lead to significant decrease of band saw fatigue life.

Popular methods of structural optimization (topology optimization, sizing optimization) can be applied to the beam structures, but this methods are uneffective in application to bandsaws, where the shape of tooth should be changed and no holes inside tooth can exist. In this work, structural shape optimization was applied to determine band saw tooth shape with optimal stress distribution. Resulting shapes have lower maximal equivalent von Mises stress and more uniform stress distribution. Results of optimization can be helpful in the band saw shape design.

Information about forces acting on the band saw tooth during cutting is very important in band saw design. It is important to know, how band saw parts are loaded in exploitation conditions. Values of cutting forces can significantly vary between species of wood, so companies which design band saws for domestic use should be interested in measurements of cutting forces for domestic species of wood. Last Polish publication comprehensively discussing the issues of cutting forces when cutting wood was published in 1960. Measurement techniques in that period was not as developed as it is today. In this work, special stand was developed for measurements of cutting forces when cutting Polish species of wood and electronic measurement devices was developed. Linden, pine and oak specimens was cut. In comparison to literature data (Orlicz T., *Obróbka drewna narzędziami tnącymi.* Wydanie IV poprawione i uzupełnione. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa 1988), it was surprising that bigger forces arise in cutting linden than pine. Cutting forces in oak specimen was the biggest.

Results presented in this work are innovative and very useful in band saw design and configuration. The guidelines contained in the work can improve the efficiency of wood cutting in mills. It can help design original and effective shapes of band saw teeth, reduce band saw vibrations, predict fatigue life and choose technological parameters of tools during automatic swaging of band saw teeth. In this work innovative technological operation of swaging band saw at the bottom of the gullet was analysed, which is very promising and can help develop more stable band saws.

Roman Król