

## REFINEMENT OF THIN LAYER OF WOOD IN HOT ROLLING PROCESS

### Summary

The present paper presents main assemblies of a machine for rolling wooden elements. The design of the assemblies directly influences parameters, which are responsible for geometrical characteristics of wood plasticisation. These parameters include: roller temperature, strength and duration of force exerted on the surface of the plasticised material. Thus, the assemblies are responsible for: adjusting the roller surface temperature, adjusting gap between the rollers and drive transmission. The parameters of wood refining process were identified on the basis of conducted theoretical analyses and, subsequently, they were used to design the machine. The solution of the formulated problem was found on the basis of the Hubera-Misesa-Hencky's hypothesis of ultimate energy of non-dilatational strain. The aim was reached by solving a set of plasticity equations for porous and orthotropic layer, by developing a formula for calculating critical stresses. As a result, we have obtained an illustration of time-dependent stress distribution in the direction towards the interior of a layer of wood under a hot rotating roller, for specific surface temperatures.

## USZLACHETNIANIE CIENKIEJ WARSTWY DREWNA WALCOWANIEM NA GORĄCO

### Streszczenie

W artykule przedstawiono trzy główne zespoły konstrukcyjne urządzenia do przemysłowego walcowania elementów drewnianych. Zespoły te bezpośrednio decydują o parametrach wpływających na kształtowanie cech geometrycznych uplastycznianego drewna. Tymi parametrami są: temperatura walca, siła jego nacisku oraz czas kontaktu z powierzchnią uplastycznianego materiału. Są to zatem zespoły: regulacji temperatury na powierzchni walców, regulacji szczeliny między walcami oraz przeniesienia napędu.

Parametry procesu uszlachetniania drewna (wygładzenia powierzchni i zagęszczenia struktury wewnętrznej) zostały określone w wyniku przeprowadzonych analiz teoretycznych. Zagadnienie rozwiązano w oparciu o hipotezę granicznej energii odkształcenia postaciowego Hubera-Misesa-Hencky'ego. Cel osiągnięto rozwiązując układ równań plastyczności dla warstwy porowatej i ortotropowej, formułując wzór określający naprężenia krytyczne. W rezultacie uzyskano ilustrację rozkładu naprężeń w głąb warstwy drewna pod obracającym się gorącym walcem w funkcji czasu, dla ustalonych temperatur na jej powierzchni. Wyniki z rozwiązania modelu matematycznego zastosowano w konstrukcji i zweryfikowano podczas praktycznego stosowania urządzenia w warunkach przemysłowych.

### Wprowadzenie

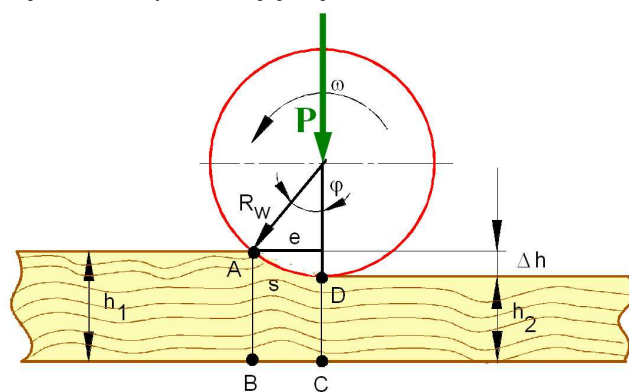
W rozwoju nowych technik wytwarzania istotne znaczenie mają, między innymi, metody projektowania i kształtowania konstrukcyjnego urządzeń do mechanicznego uplastyczniania materiałów o strukturze porowatej i anizotropowej, takich jak np. drewno. Materiały takie stosowane są często w różnych maszynach rolniczych.

Tematyka ta wynika głównie z praktyki inżynierskiej, z niepełnego rozpoznania zagadnień obróbki plastycznej, wytrzymałości i nośności granicznej wyżej wspomnianych materiałów. Inspiracją do podjęcia problemu teoretycznego opisu procesu uplastyczniania takich materiałów było opracowanie przez zespół pracowników Zakładu Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Poznańskiej konstrukcji urządzenia praktycznie spełniającego ten cel. Urządzenie umożliwia realizację nowatorskiego procesu walcowania drewna w sposób ciągły i w podwyższonej temperaturze.

Walcowanie na gorąco elementów drewnianych może dotyczyć zastosowań tej metody między innymi w maszynach rolniczych a jego rezultatem jest uszlachetnienie przypowierzchniowej, cienkiej warstwy drewna. Przez uszlachetnienie rozumie się wygładzenie powierzchni i zagęszczenie struktury wewnętrznej [4] (rys. 1).

Pod wpływem działania temperatury na zewnętrzną warstwę drewna, zachodzą w nim procesy hydrolizy, uplastyczniające strukturę. Podczas równoczesnego działania nacisku, uplastyczniona lignina (stanowi ok. 40% objętości

drewna) wypełnia pory, co wpływa korzystnie na gładkość powierzchni oraz zagęszczenie struktury. Ponadto działanie nacisku na powierzchnię drewna, z równoczesnym jej grzaniem, wywołuje w warstwie przypowierzchniowej konsolidację struktury oraz jej ujednorodnienie, co osłabia



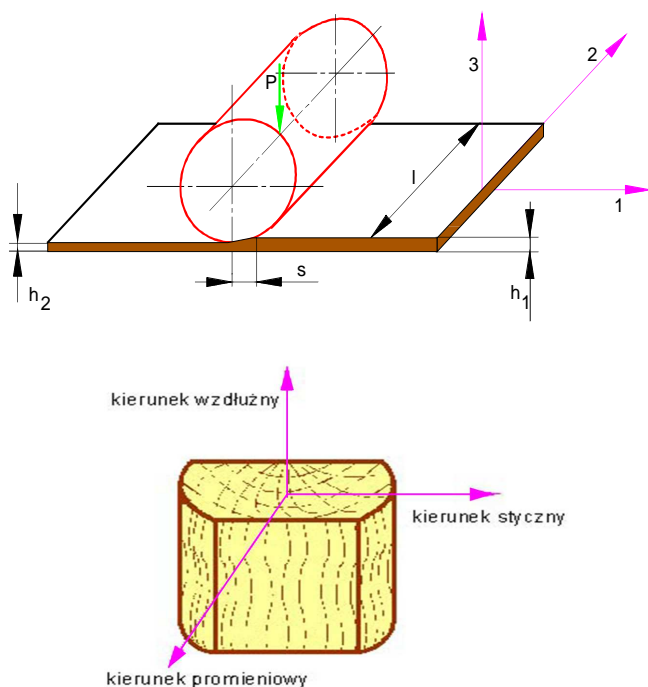
Rys. 1. Parametry geometryczne walca i warstwy drewna w procesie walcowania, gdzie:  $P$  – siła nacisku walca,  $R_w$  – promień walca,  $h_1$  – grubość warstwy drewna przed walcowaniem,  $h_2$  – grubość warstwy drewna po walcowaniu,  $\Delta h$  – zgniot bezwzględny,  $\varphi$  – kąt oparty na łuku kontaktu walca z powierzchnią drewna,  $s$  – długość łuku kontaktu walca z powierzchnią drewna,  $e$  – rzut prostokątny łuku,  $\omega$  – prędkość obrotowa walca, ABCD – analizowany obszar.

Fig. 1. Geometric parameters of the roller and a layer of wood in the rolling process

anizotropowość, zmierzając do wyrównania cech kierunkowych czyniąc tę warstwę bardziej odporną na działanie warunków zewnętrznych, w tym wilgoci. Tak ukształtowaną wierzchnią warstwę drewna cechuje gładkość, co pozwala w znacznym stopniu wyeliminować jej szlifowanie, oraz większa gęstość, co stwarza możliwość ograniczenia zużycia lakierów. Następuje też wzrost wytrzymałości wpływający korzystnie na właściwości drewna w określonych zastosowaniach technicznych.

## 1. Model matematyczny

Analizę odkształceń plastycznych w interesującej nas cienkiej warstwie drewna oparto na uogólnionym modelu ośrodka idealnie plastycznego. W modelowaniu procesu walcowania na gorąco warstwy drewna podstawowe znaczenie ma wyężenie graniczne materiału, przy którym zaczyna się jego plastyczne płynięcie. Wartość tego naprężenia zależy od właściwości termomechanicznych materiału oraz od trzech podstawowych parametrów procesu: temperatury walca, siły jego nacisku i czasu kontaktu z uplastycznianą powierzchnią (rys. 2).



Rys. 2. Kierunki główne naprężenia walcowanej warstwy drewna, gdzie: 1, 2, 3 - kierunki główne: równoległy, styczny, promieniowy, P - siła nacisku walca, s - długość kontaktu walca z warstwą drewna, h<sub>1</sub> - grubość warstwy drewna przed walcowaniem, h<sub>2</sub> - grubość warstwy drewna po walcowaniu, l - szerokość warstwy drewna

Fig. 2. Principal stress directions related to rolled layer of wood

Warunek plastyczności opisuje związek zachodzący pomiędzy składowymi stanu naprężenia, temperaturą oraz parametrami struktury wewnętrznej dla granicznego wyężenia materiału. Odpowiada to momentowi ujawnienia się pierwszych odkształceń trwałych w rozpatrywanym punkcie ciała. Związek ten, wyrażający kryterium plastyczności dla materiału anizotropowego i porowatego podlegającego wpływowi temperatury, zapiszemy ogólnie jako funkcję skalarną w postaci:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, f_v, T) = 0, \quad (1)$$

gdzie:

$\boldsymbol{\sigma}$  - anizotropowy stan naprężenia,  
 $f_v$  - funkcja skalarna porowatości,  
 $T$  - funkcja skalarna temperatury.

Szczególnie istotna jest wartość temperatury w warstwie przypowierzchniowej, decydująca o efektywności procesu uszlachetniania drewna. Zagadnienie przekazywania ciepła między gorącym walcem a powierzchnią drewna opisano dla dwukierunkowego, nieliniowo zmiennego przewodzenia ciepła za pomocą równania przewodnictwa Fouriera. Do jego dokładnego rozwiązania wykorzystano, po zastosowaniu dyskretyzacji, metodę elementów skończonych [3]. O dokładności tego rozwiązania decydują funkcje (lub stałe) materiałowe drewna, które określają współczynnik dyfuzyjności ciepła w równaniu Fouriera.

Przy założeniu nieustalonego przewodzenia ciepła w jednej płaszczyźnie oraz osłony adiabatycznej na brzegu rozważanego obszaru, proces opisuje następujące równanie Fouriera [2, 8]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

gdzie: a - współczynnik dyfuzyjności  $a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \gamma}$ , decydu-

jący o dokładności rozwiązania rozkładu temperatury w analizowanej warstwie drewna, T - temperatura, c<sub>p</sub> - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,  $\gamma$  - ciężar właściwy,  $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła.

Do równania wprowadzono doświadczalnie wyznaczone funkcje opisujące wpływ temperatury i anizotropii na współczynnik przewodzenia ciepła w sposób następujący [2]:

$$\lambda_{\perp} = f(T), \quad c_p = f(T),$$

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_r + \lambda_t}{2} \quad \text{or} \quad \lambda_{\perp} = \lambda_r = \lambda_t, \quad (3)$$

gdzie:  $\lambda_{\perp}$ ,  $\lambda_r$ ,  $\lambda_t$  - współczynniki przewodzenia ciepła w kierunkach odpowiednio: prostopadłym, promieniowym i stycznym do włókien.

Zakładając materiał szkieletu jako ośrodek idealnie plastyczny bez wzmocnienia, dla którego odkształcenia plastyczne znacznie dominują nad sprężystymi oraz wprowadzając funkcję porowatości objętościowej, warunek (1) przyjmie następującą szczegółową formę [5, 6, 7]:

$$\text{tr} \mathbf{S}^2 + \psi_1 \text{tr}^2 \boldsymbol{\sigma} = \psi_2 \mathbf{Y}_1^2, \quad (4)$$

gdzie:

$\psi_1$  i  $\psi_2$  - funkcje porowatości,  
 $\boldsymbol{\sigma}$  - tensor naprężeń w materiale,  
 $\mathbf{S}$  - część dewiatorowa tensora naprężeń,  
 $\mathbf{Y}_1$  - granice plastyczności przy rozciąganiu w wybranym kierunku głównym.

Dla płaskiego stanu naprężeń warunek plastyczności przyjmie następującą postać:

$$\sigma_1^2 + \alpha \sigma_2^2 - (1 + \alpha - \beta) \sigma_1 \sigma_2^2 + A \sigma_1^2 + A \alpha \sigma_2^2 + 2A(1 + \alpha - \beta) \sigma_1^2 \sigma_2^2 = B \mathbf{Y}_1^2, \quad (5)$$

gdzie:  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  – naprężenia główne na kierunkach anatomicznych: 1 – równoległym do włókien, 2 – stycznym (rys. 2).

Wprowadzamy naprężeniowe współczynniki ortotropii ( $\alpha$  i  $\beta$ ) oraz funkcje porowatości (A, B):

$$\alpha = \left( \frac{Y_1}{Y_2} \right)^2, \quad \beta = \left( \frac{Y_1}{Y_3} \right)^2, \quad A = \frac{f_v}{1 - f_v}, \quad B = 1 - f_v, \quad (6)$$

przy czym:  $f_v \rightarrow 0, A \rightarrow 0, B \rightarrow 1,$   
 $f_v \rightarrow 1, A \rightarrow \infty, B \rightarrow 0,$

Tak więc warunek plastyczności (4) przyjmuje postać hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego dla pełnego materiału. Powyższy warunek jest podstawą do określenia krytycznego nacisku walca (nośność graniczna) w funkcji temperatury oraz właściwości struktury, który można zapisać następująco:

$$p = \sqrt{\left[ \frac{B}{(1+A) - \frac{(1-2A)^2(1+\alpha-\beta)}{4\alpha(1+A)}} - \frac{B}{A(3+3\alpha-2\beta)} \right] Y_1^2}, \quad (7)$$

gdzie:

p- naprężenia wywołane naciskiem walca na uplastycznianą powierzchnię,

$\alpha$  i  $\beta$  - naprężeniowe współczynniki ortotropii,

$Y_1$  – granica wytrzymałości przy rozciąganiu wzdłuż włókien.

W analizowanym przypadku proces uplastycznienia przebiega podczas wzrostu temperatury w określonym czasie, stąd granica plastyczności  $Y_1$  opisana została funkcją empiryczną uwzględniającą tę zależność. Wzór (7) pozwala określić krytyczny stan naprężenia w interesującej nas warstwie drewna, po przekroczeniu którego, następuje odkształcenie plastyczne. Otrzymana zależność (7) na graniczne naprężenie w warstwie materiału porowatego i anizotropowego może być wykorzystana do racjonalizacji kształtowania jego cech geometrycznych, jak również do kształtowania cech konstrukcyjnych projektowanych urządzeń realizujących ten cel.

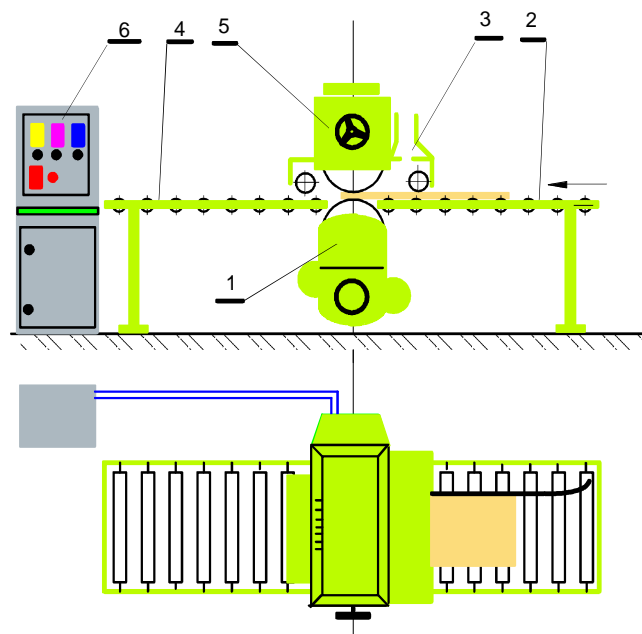
### 3. Konstrukcja

Dla opisu procesu uplastycznienia istotna jest znajomość rozkładu temperatury i naprężeń w wierzchniej warstwie drewna oraz czas jej kontaktu z gorącym walcem. Przedstawimy zatem te zespoły konstrukcyjne urządzenia do walcowania elementów drewnianych, które decydują o efektywności wymienionych parametrów, charakterystycznych dla wyżej omawianego procesu. Zespoły te bezpośrednio decydują o parametrach wpływających na kształtowanie cech geometrycznych uplastycznianego drewna, którymi są temperatura walca, siła jego nacisku oraz czas kontaktu z powierzchnią uplastycznianego materiału. Są to zatem zespoły regulacji szczeliny między walcami i przeniesienia napędu (rys. 4) oraz regulacji temperatury na powierzchni walców (rys. 5).

Parametry procesu uszlachtniania drewna zostały określone w wyniku przeprowadzonych analiz teoretycznych z wykorzystaniem kryterium naprężeń na granicy plastyczności (7), a następnie zastosowane w konstrukcji i zweryfikowane podczas praktycznego stosowania urządzenia w warunkach przemysłowych.

Wdrażając kolejne walcarki do realizacji tego celu wprowadzono zmiany konstrukcyjne wynikające z badań i doświadczeń eksperymentalnych, a dotyczące przede wszystkim tych zespołów, które bezpośrednio decydują o parametrach wpływających na proces uplastyczniania drewna [1].

Prace prowadzono kompleksowo w zakresie: studialno-projektowym, organizacji i nadzoru wykonawstwa, eksperymentalno-doświadczalnym oraz wdrożeniowym. Opracowano dwie konstrukcje prototypowe, a następnie wersję urządzenia do przemysłowego stosowania. Schemat poglądowy urządzenia zamieszczono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat urządzenia do uszlachtniania elementów drewnianych

gdzie: 1 – klatka walcownicza z zespołem przeniesienia napędu i regulacji położenia górnego walca, 2 – zespół transportowy na wejściu, 3 – zespół oczyszczająco-wentylacyjny, 4 – zespół transportowy na wyjściu, 5 – układ regulacyjno-pomiarowy szczeliny między walcami, 6 – układ sterujący

Fig. 3. Design of a machine for refining veneer and veneered furniture elements

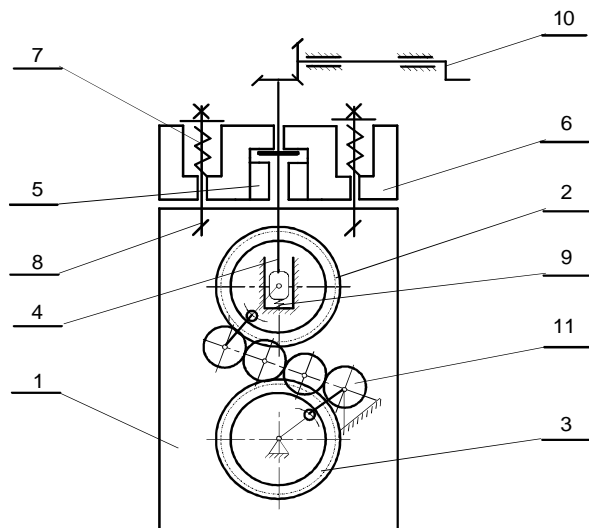
Konstrukcję zespołu regulacji szczeliny między walcami i przeniesienia napędu przedstawiono na schemacie kinematycznym (rys. 4). Elastyczne podwieszenie górnego walca zrealizowano tak, że jego czopy podparte są na zespołach sprężyn śrubowych 9 i jednocześnie połączone za pośrednictwem śrub 4 z belką poprzeczną 6. W belce poprzecznej 6 osadzone są pakiety sprężyn talerzowych 7, których napięcie wstępne można regulować za pomocą śrub dwustronnych 8. Mechanizm regulacji szczeliny między walcami 10, pozwala na ustalanie położenia walca z dokładnością do 0,05 mm. Ciągłość przeniesienia napędu, niezależnie od rozsunięcia walców w zakresie od 0 do 27 mm, zapewnia układ kół zębatych 11.

Z mechanizmem regulacji szczeliny między walcami 10 związany jest wskaźnik, umożliwiający odczyt jej wartości na skali z dokładnością do 0,05 mm. Wartość odczytu wielkości szczeliny między walcami połączono z wielkością nacisku liniowego walca na powierzchnię drewna, za pomocą znanej charakterystyki układu sprężyn 7.

Ogrzewany elektrycznie walec stanowi roboczy zespół urządzenia bezpośrednio oddziaływujący na walcowany element. Jego cylindryczną powierzchnię zewnętrzną po-

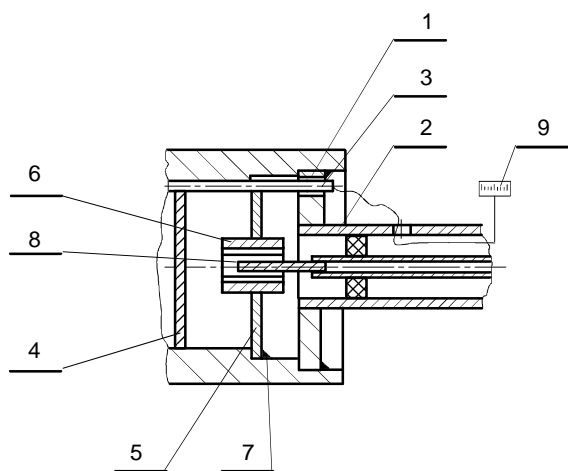
kryto chromem technicznym i poddano szlifowaniu oraz dogładzaniu. W celu kontroli i płynnej regulacji temperatury, skonstruowano układ pomiarowy tak, że czujnik został umieszczony wewnątrz walca w osi jego obrotu. Schemat tego rozwiązania przedstawiono na rys. 5. Taka konstrukcja zapewnia prowadzenie ciągłych pomiarów temperatury powierzchni zewnętrznej walca oraz wymaganą czułość termoregulacyjną. Układ automatycznej regulacji temperatury pozwala utrzymywać jej wartość na zadanym poziomie, w warunkach pracy ciągłej z dokładnością do 3°C, wystarczającą do celów praktycznych.

Konstrukcja przekładni 11 (rys. 4) oraz przedstawione rozwiązanie pomiaru temperatury na powierzchni walca (rys. 5), noszą cechy oryginalności, co potwierdzono przyznaniem każdemu z nich patentu.



Rys. 4. Schemat kinematyczny regulacji położenia górnego walca i zespołu przeniesienia napędu, gdzie: 1 – ostojnica, 2 – koło zębate na walcu górnym, 3 – koło zębate na walcu dolnym, 4 – śruba regulacyjna, 5 – układ prowadzący śruby, 6 – belka poprzeczna, 7 – pakiet sprężyn talerzowych, 8 – śruba dwustronna, 9 – zespół sprężyn śrubowych, 10 – mechanizm regulacji szczeliny, 11 – układ kół zębatach

Fig. 4. Kinematical diagram of the drive transmission assembly with the upper roll controlling device



Rys. 5. Rozwiązanie konstrukcyjne pomiaru temperatury powierzchni walca, gdzie: 1 – cylindryczny płaszcz walca, 2 – czop walca, 3 – element grzejny, 4 – przegroda, 5 – łącznik miedziany, 6 – tulejka miedziana, 7 – pierścień stalowy, 8 – czujnik, 9 – regulator temperatury

Fig. 5. Design of the temperature measurement system

System bezstopniowej regulacji prędkości liniowej obracających się walców zrealizowano, stosując odpowiedni układ sterujący pracą silnika elektrycznego, który usytuowano w szafie sterowniczej 6 urządzenia (rys. 3).

## Wnioski

Na podstawie doświadczeń wynikających z analiz teoretycznych oraz realizacji kolejnych etapów projektowo-konstrukcyjnych i wdrożeniowych urządzenia do przemysłowego uszlachetniania elementów drewnianych można sformułować następujące wnioski:

- w modelowaniu konstrukcyjnym tego procesu podstawowe znaczenie ma naprężenie na granicy wytrzymałości, podczas którego następuje jego plastyczne płynięcie,
- strukturę modelu matematycznego oparto na związkach konstytutywnych, opisujących właściwości termomechaniczne materiału, porowatość oraz parametry procesu, dążąc do zadawalającego wyniku rozwiązania jak i prostej formy (7) efektywnie wspomagającej proces projektowania inżynierskiego,
- teoretyczny opis badanego procesu, w postaci modelu matematycznego, sprzyja w efekcie uściśleniu metody projektowania konstrukcji urządzenia, bardziej realnych jego wymiarów i parametrów procesu,
- otrzymany wzór (7), na graniczne naprężenie w warstwie materiału porowatego i anizotropowego, stanowi narzędzie, za pomocą którego można wspomagać projektowanie cech geometrycznych, materiałowych i funkcjonalnych, jest też łatwy do wykorzystania w obliczeniach praktycznych,
- efektywność procesu uszlachetniania powierzchni drewna zależy przede wszystkim od parametrów tego procesu a do ich określenia na etapie projektowym niezbędnym wsparciem jest sformułowany model matematyczny.

## Literatura

- [1] Dudziak M., Malujda I.: Machine for rolling wooden elements. 6-th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv. Lviv 2003
- [2] Kania S. Przepływ ciepła przez materiały drzewne. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990
- [3] Kleiber M., Służalec A.Sz.: Numerical analysis of heat flow in flash welding. Arch. Mech.35, 1983 pp, 687 – 699
- [4] Malujda I.: Use of a model of anisotropic and porous material plasticization for solving yield points in a layer of wood. The Eighth International Conference, Puchov, Slovakia 2003
- [5] Malujda I., Mielniczuk J.: Mathematical Model of wood hot rolling process. GAMM, 75-th Annual Scientific Conference Dresden, March 21–27, 2004
- [6] Szczepiński W. Mechanika plastycznego płynięcia. PWN, Warszawa 1978
- [7] Walczak J. Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. PWN, Warszawa – Kraków 1978
- [8] Taler J., Duda P.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. WNT, Warszawa 2003.