

dr hab. inż. Jan OSIKA, prof. AGH, dr inż. Daniel POCIECHA  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków  
E-mail: osika@agh.edu.pl

# Wpływ stanu naprężenia na odkształcalność graniczną w nowym procesie pielgrzymowym walcowania rur na zimno

## *Strain state impact on formability in new cold pilger rolling process*

### Streszczenie

Proces walcowania pielgrzymowego rur na zimno jest z powodzeniem wykorzystywany do produkcji wysokojakościowych rur z metali nieżelaznych i ich stopów. Zarówno klasyczne podejście, jak i nowa metoda walcowania pielgrzymowego rur z nieruchomą klatką, zapewniają wysoką jakość uzyskanych wyrobów, zarówno w aspekcie powierzchni rury, jak i własności wytrzymałościowych. W niniejszej pracy zaprezentowano analizę nowego procesu pielgrzymowego z nieruchomą klatką walcowniczą, pod kątem możliwości zastosowania metody KOBO w walcowaniu pielgrzymowym rur. Badania pól odkształceń w stożku roboczym wykonywane były na rurach aluminiowych, z zastosowaniem oraz bez zastosowania głowicy ZSN wymuszającej dodatkowy moment skręcający w trakcie walcowania. Działanie głowicy wywołuje zmianę stanu naprężenia w chwilowej kotlinie walcowniczej. W oparciu o analizę stanu mechanicznego wg koncepcji Pelczyńskiego zbadano wpływ stanu naprężenia dla obu wariantów. Podjęto również próbę wyznaczenia odkształcalności granicznej. Przeprowadzone badania potwierdzają teoretyczną analizę stanu zagadnienia, stąd wykorzystanie metody KOBO w procesie walcowania pielgrzymowego jest jak najbardziej uzasadnione.

### Abstract

*Cold pilger rolling process is often used to producing of high quality tubes made from nonferrous metals and alloys. Both classical approach and new method of rolling with the stationary stand, ensures high quality of the product – tube surface, and mechanical properties. In this paper, analysis of the new concept with stationary stand and KOBO method was presented. Strain fields in deformation zone investigations were taken on aluminum tubes, both, with and without VSS head, which allows add additional torque moment during rolling. VSS head causes strain state modification in temporary rolling zone. Basis on mechanical states, due to Pelczynski concept, strain states was investigated on both variants. Maximum formability calculation was also investigated in this work. Due to the results theoretical calculation were confirmed, so the KOBO method can be implemented in cold pilger rolling process.*

**Słowa kluczowe:** stan naprężenia, walcowanie pielgrzymowe, odkształcalność, metoda KOBO

**Keywords:** strain state, cold pilger rolling, formability, KOBO method

## 1. WPROWADZENIE

Nowy proces walcowania rur na zimno w walcarkach pielgrzymowych jest nowatorskim rozwiązaniem, nigdy wcześniej niestosowanym w skali światowej. Dotychczasowe badania tego procesu były prowadzone w Katedrze Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa AGH, gdzie wykonano modelową walcarkę pielgrzymową nowej generacji, opartą na autorskiej koncepcji bę-

## 1. INTRODUCTION

*New cold rolling process in pilger mills is an innovative solution, never used in worldwide scale. Up to now research on this process was lead in KPPiMMN, AGH University of Science and Technology, where new generation model pilger roll were developed, based on patented solution [1].*

danej przedmiotem patentu [1]. Do zalet tego rozwiązania technicznego procesu walcowania rur na zimno w walcierce z nieruchomą klatką należą przede wszystkim: obniżenie o ponad 60% ciężaru mas ruchomych wykonujących ruch posuwisto-zwrotny oraz możliwość znacznego zwiększenia masy klatki roboczej, co pozwala znacznie zwiększyć odkształcenie plastyczne, a zatem można spodziewać się większej wydajności i polepszenia struktury wyrobu. Dodatkowo prototypowa modelowa walcarka pielgrzymowa została wyposażona w specjalną głowicę umożliwiającą przyłożenie do stożka roboczego dodatkowej siły osiowej (rozciągającej lub ścisniającej) oraz momentu skręcającego (tylko w jednym kierunku). Głowica ta dalej będzie zwana głowicą ZSN (Zmienny Stan Naprężenia). W ten sposób uzyskano możliwość aktywnej zmiany stanu naprężenia w chwilowej kotlinie pielgrzymowej. Dzięki temu rozwiązaniu będzie można oczekiwać dalszego zwiększenia odkształcalności granicznej [2], możliwego wzrostu wydajności oraz uzyskanie innej, lepszej struktury walcowanej rury. Badania zmian warunków odkształcenia w chwilowej kotlinie pielgrzymowej spowodowanych przyłożeniem dodatkowego momentu skręcającego pozwolą ocenić celowość zastosowania metody KOBO w tym procesie. Metoda ta – zastosowana już w procesie wyciskania – polega na przyłożeniu takiego momentu skręcającego działającego przemiennie w obu kierunkach (cyklicznego) z ustaloną częstotliwością, uzależnioną od prędkości odkształcenia. Jej zastosowanie wywołuje trudne do wyjaśnienia efekty zmian strukturalnych materiału oraz zmniejszenia energii odkształcania [3]. Dodatkowo w nowym procesie pielgrzymowym z zastosowaniem głowicy ZSN istnieje jeszcze możliwość przyłożenia cyklicznie zmiennej siły osiowej, co może zwiększyć skutek działania metody KOBO.

Dotychczasowe badania nowego procesu walcowania pielgrzymowego miały charakter poznawczy. Posługując się metodami modelowania matematycznego i fizycznego, wyznaczano pola odkształceń w stożku roboczym i siły walcowania (wewnętrzne) [4–6]. Natomiast wyznaczanie pól odkształcenia i naprężenia w chwilowej kotlinie pielgrzymowej było możliwe tylko drogą symulacji numerycznej. Do rozwiązania przestrzennego zadania zastosowano metodę ele-

*The advantages of this solution where stand are stationary are mainly lesser contribution of movable masses (about 60%) which make reciprocating move, and the possibility of rolling stand weight increase. It will causes plastic deformation increase, so pilger roller capacity increase and tube quality improvement are expected. Additionally, the prototype model pilger mill has been provided with a special head making it possible to apply additional axial force (tensile or compressing) and torsional moment (twisting in one direction only) to the working cone. Hereinafter, the head will be referred to as the VSS (Variable Strain State) head. In this way, the possibility of active strain state alteration in the momentary pilger roll gap has been obtained. Thanks to this solution, further increase of formability can be expected [2], as well as possible growth of productivity and obtaining of other, better structure of the tube being rolled. Investigation of the alteration of the deformation conditions in the momentary pilger gap resulting from the application of the additional torsional moment will allow for the assessment of the purposefulness of the application of the KOBO method in the process. The method, already applied in the process of extrusion, consists in application of such a torsional moment acting alternately in both directions (cyclic with predetermined frequency depending on the deformation speed. The application of the method results hardly explicable effects of the material structure changes and reduction of the deformation energy [3]. Furthermore, in the new pilger process, with the use of the VSS head, there is a possibility of applying cyclically changing axial force, which can increase the result of the KOBO method.*

*Up to date new pilger rolling process research, has a cognitive character. Using mathematical and physical modeling, deformation fields in working cone, and internal forces was calculated [4–6]. On the other hand, the determination of strain and stress fields in the momentary pilger gap was possible only in the way of numerical simulation. In order to solve the spatial problem, the finite element method has been applied with the use of the professional program,*

elementów skończonych, wykorzystując profesjonalny program ABAQUS v. 6.9 [7]. Na podstawie przeprowadzonych badań sił walcowania stwierdzono, że skutkiem zmian pola naprężenia w kotlinie pielgrzymowej wielkość maksymalnej siły nacisku metalu na walce może zmniejszyć się o ok. 10–20%, a ciśnienie w siłowniku głównym o około 15%, co świadczy o zmniejszeniu zużycia energii [6, 7].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań pól odkształceń w stożku roboczym w procesie walcowania rur aluminiowych w modelowej walcierce pielgrzymowej bez oraz z zastosowaniem głowicy ZSN wymuszającej dodatkowy moment skręcający. Działanie tej głowicy wywoła zmianę stanu naprężenia w chwilowej kotlinie pielgrzymowej zmieniającej swój kształt i wymiary w zależności od drogi sąń. W rezultacie zmieniają się także siły walcowania, zużycie energii oraz odkształcalność graniczna walcowanego materiału. Przyjmuje się, że zarówno w klasycznym, jak i nowym procesie pielgrzymowym maksymalna wydajność ograniczona jest dopuszczalnym naciskiem metalu na walce  $F_{dop}$  lub dopuszczalnym odkształceniem, które są wyrażone minimalnym współczynnikiem cząstkowych odkształceń  $n_{dmin}$  [2, 3]. Obie te wielkości zależne są od przemieszczenia liniowego  $m\lambda_c$ , a warunek maksymalnie możliwej do uzyskania wydajności procesu przyjmuje postać:

$$\left. \begin{array}{l} F_v(m\lambda_c) \leq F_{dop} \\ \text{lub} \\ n_d(m\lambda_c) \leq n_{dmin} \end{array} \right\} \quad (1)$$

Tak więc będzie ona ograniczona albo czynnikiem konstrukcyjnym (siłami walcowania), albo materiałowym (odkształcalnością graniczną). Oczywiście mniejsza z tych dwóch wartości przemieszczeń liniowych wyznacza maksimum możliwej do uzyskania wydajności.

Głównym celem niniejszej pracy było badanie wpływu zmiennego stanu naprężenia na wielkość  $n_{dmin}$ , traktowanej jako miarę odkształcalności granicznej w nowym procesie walcowania rur w walcarkach pielgrzymowych. Z konieczności, ze względu na małą moc napędu walcarki modelowej, badania ograniczono tylko do rur aluminiowych.

ABAQUS v. 6.9 [7]. Basing on the examination of the rolling, it has been found that, due to the alterations of the stress field in the pilger gap, the magnitude of the maximum force of the metal pressing on the rolls can be reduced by about 10–20% and the pressure in the main servomotor by about 15%, which proves reduction of energy consumption [6, 7].

According to measurements of rolling forces, pressure on rollers decrease about 10–20%, when strain filed was modified [6, 7]. Additional torque moment, changes the strain state in temporary working zone. This zone shape and dimensions are changing, depend on position of ledge. In the results forces, energy consumption and maximum deformation are changing too. In general, both in classical solution and in new pilger rolling process, maximum deformation of rolled material, is limited by maximum material pressure applied on rollers  $F_{dop}$  or acceptable strain, expressed by a minimal factor of partial deformation  $n_{dmin}$  [2, 3]. Those both values are in relation with linear displacement  $m\lambda_c$ , and maximum possible to obtain capacity condition could be presented as:

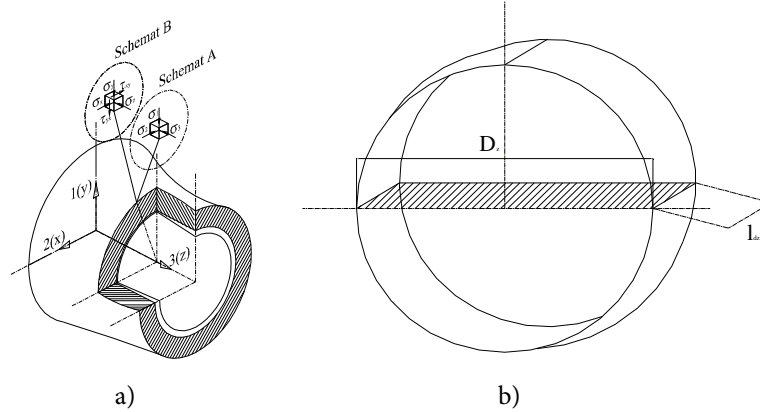
$$\left. \begin{array}{l} F_v(m\lambda_c) \leq F_{dop} \\ \text{or} \\ n_d(m\lambda_c) \leq n_{dmin} \end{array} \right\} \quad (1)$$

So capacity will be limited by construction factors (rolling forces) or by material factors (maximum formability). Of course, the lower of the two linear dislocation values determines the maximum obtainable productivity.

Main aim of our research was investigations on relation between variable strain state and  $n_{dmin}$ , taken as measure of maximum deformation in new tube cold pilger rolling process. Due to the low power of the model rolling mill drive, the investigation has been limited to aluminium tubes.

## 2. STAN NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCALNOŚĆ GRANICZNA W CHWILOWEJ KOTLINIE PIELGRZYMOWEJ

## 2. STRESS STATE AND MAXIMUM DEFORMATION IN TEMPORARY PILGER WORKING ZONE



Rys. 1. Stan naprężenia (a) oraz uproszczony kształt chwilowej kotliny odkształcenia (b)  
 Fig. 1. Strain state (a) and simplified shape of temporary working zone (b)

Badania wpływu stanu naprężenia w chwilowej kotlinie odkształcenia na przebieg nowego procesu pielgrzymowego – podobnie jak w [2] – oparto na analizie stanu mechanicznego wg koncepcji Pelczyńskiego. Dzięki dużej zgodności z wynikami doświadczalnymi oraz dużej prostocie i przejrzystości w prezentacji wyników koncepcja tego autora jest do dzisiaj często używana do oceny stanów naprężenia i odkształcalności granicznej w różnych procesach przeróbki plastycznej. Zastosowanie głowicy ZSN w nowym procesie pielgrzymowym wymaga przeprowadzenia analizy stanu naprężenia dla dwóch wariantów walcowania bez i z jej użyciem. Na rys. 1a przedstawiono kształt chwilowej kotliny pielgrzymowej z przyjętym globalnym układem współrzędnych  $xyz$ . Można przyjąć, że w pierwszym przypadku – gdy nie działa głowica ZSN – osie tak przyjętego układu współrzędnych pokrywają się z kierunkami głównymi 1, 2, 3, w których działają naprężenia główne  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\sigma_3$  (schemat A). Przyjmując dalej, że:  $x \rightarrow 2$ ,  $y \rightarrow 1$ ,  $z \rightarrow 3$  oraz nie popełniając większego błędu  $B_z = D_z$ , a długość kotliny równą  $l_d$  można przyjąć za jej uproszczony kształt cylindryczny, zgodnie z rys. 1b. Wtedy korzystając z analizy stanu naprężenia w chwilowej kotlinie pielgrzymowej przedstawionej w [2], tensor naprężenia można przedstawić w postaci:

Researches on influence of strain state in temporary working zone on conditions of new pilger rolling process, was based on mechanical state analysis due to the Pelczynski concept, similar as in [2]. Because of high accordance with experimental results, and high transparent of obtained effects, those concept is often used to validation of strain states, and maximum formability in various metal works processes. Apply of VSS head in new pilger rolling process, needs to make stress state analysis in two rolling variants, with, and without VSS head. On Fig. 1a shape of temporary working zone is presented, where global coordinate system  $xyz$ , is used. In first case, when VSS head is not used, axis at this coordinate system cover main directions 1, 2, 3, in which principal stresses are present  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\sigma_3$  (A scheme). If  $x \rightarrow 2$ ,  $y \rightarrow 1$ ,  $z \rightarrow 3$ , and without major deviation  $B_z = D_z$ , and the length of roll gap  $l_d$ , it can be simplified by cylindrical shape (Fig. 1b). Using strain state analysis in temporary working zone presented in [2], strain tensor could be presented as:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \sigma_1 = \frac{F_h}{A_z} \\ \sigma_2 = 0.8\sigma_3 \\ \sigma_3 = \frac{m_t F_v}{A_v} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \sigma_1 = \frac{F_h}{A_z} \\ \sigma_2 = 0.8\sigma_3 \\ \sigma_3 = \frac{m_t F_v}{A_v} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

$$A_z = \pi(D_z - g_z)g_z$$

$$A_v = D_z l_{dz}$$

$$l_{dz} = \sqrt{(D - D_z)\Delta g_{zp}}$$

$$\Delta g_{zp} = \begin{cases} \xi_p m \lambda_z \frac{dg_z}{dz} \text{ dla posuwu pojedynczego} \\ m_p \lambda_z \frac{dg_z}{dz} \text{ dla posuwu podwójnego} \end{cases}$$

$$\frac{dg_z}{dz} \cong \frac{g_{k-1} - g_k}{z_k - z_{k-1}}$$

$F_v$  – nacisk metalu na walce,  $F_h$  – siła osiowa w rurze,  $A_h$  – pole rzutu poziomego powierzchni styku metalu z wykojem,  $A_z$  – pole przekroju poprzecznego,  $D_{k-1}$ ,  $g_{k-1}$  – średnica zewnętrzna, grubość ścianki i średnica wewnętrzna rury w przekroju  $k-1$ ,  $D_k$ ,  $g_k$  – średnica zewnętrzna, grubość ścianki i średnica wewnętrzna rury w przekroju  $k$ ,  $D_x, g_x$  – średnica zewnętrzna, grubość ścianki i średnica wewnętrzna rury w przekroju  $x$ ,  $l_d$  – długość łuku styku w chwilowej kotlinie pielgrzymowej (odległość między przekrojami  $k-1$  i  $k$ ,  $\xi_p = 0.7$  współczynnik definiujący część odkształcenia przypadająca na ruch sań w tył),  $\mu = 0.05$  współczynnik tarcia,  $m_t$  – współczynnik oporu plastycznego płynięcia.

Współczynnik plastycznego płynięcia przedstawia część oporu odkształcenia zużytą na wykonanie odkształcenia plastycznego, czyli:

$$l_{dz} = \frac{\sigma_{plz}}{p_z} \quad (3)$$

gdzie:  $\sigma_{plz}$  – naprężenie uplastyczniające w położeniu sań  $z$ ,  $p_z$  – nacisk jednostkowy w położeniu sań  $z$ .

Jeżeli przy pomocy głowicy ZSN spowoduje się tylko zmianę siły osiowej, nie zmieni się schematu obciążenia; nadal pozostanie układ główny 1, 2, 3 o niezmiennym kierunku działania osi. Natomiast przyłożenie momentu skręcającego  $M_s$  wywoła działanie obwodowych naprężeń stycznych, co zmieni schemat obciążenia na B (zob. rys. 1a). Wyznaczając obwodowe naprężenie styczne ze znanego z wytrzymałości mate-

where:

$$A_z = \pi(D_z - g_z)g_z$$

$$A_v = D_z l_{dz}$$

$$l_{dz} = \sqrt{(D - D_z)\Delta g_{zp}}$$

$$\Delta g_{zp} = \begin{cases} \xi_p m \lambda_z \frac{dg_z}{dz} \text{ for one advance} \\ m_p \lambda_z \frac{dg_z}{dz} \text{ for two advances} \end{cases}$$

$$\frac{dg_z}{dz} \cong \frac{g_{k-1} - g_k}{z_k - z_{k-1}}$$

$F_v$  – metal pressure on rollers,  $F_h$  – axial force in tube,  $A_h$  – horizontal projection area where metal contacts pass of roll,  $A_z$  – cross section area,  $D_{k-1}$ ,  $g_{k-1}$  – full diameter, wall thickness, and inside diameter in  $k-1$  cross section,  $D_k$ ,  $g_k$  – full diameter, wall thickness, and inside diameter in  $k$  cross section,  $D_x, g_x$  – full diameter, wall thickness, and inside diameter in  $x$  cross section,  $l_d$  – contact angle length in temporary working zone (distance between cross sections  $k-1$  i  $k$ ),  $\xi_p = 0.7$  coefficients which defines part of deformation when sledge go backward),  $\mu = 0.05$  friction coefficient,  $m_t$  – deformation resistance coefficient.

Plastic flow coefficient presents part of deformation resistance consumed by plastic deformation:

$$l_{dz} = \frac{\sigma_{plz}}{p_z} \quad (3)$$

where:  $\sigma_{plz}$  – yield stress in sledge  $z$  position,  $p_z$  – unit pressure in sledge  $z$  position.

If VSS head changes only axial force, load scheme aren't changing, main coordinate system 1, 2, 3, is still present with the same axial directions. But if torque moment  $M_s$  is present, it causes tangential circumferential stress activity, witch changes load scheme to B (Fig. 1a). Determining of tangential circumferential stress from

riałów wzoru dla pierścienia, można przedstawić tensor naprężenia dla tego schematu odkształcenia w postaci:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x = \frac{F_v}{A_h} & \tau_{xy} \approx 5.1 \frac{M_s}{D_z} \frac{1}{1-\delta^4} & 0 \\ \tau_{yx} \approx 5.1 \frac{M_s}{D_z} \frac{1}{1-\delta^4} & \sigma_y = \frac{F_v}{A_v} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z = \frac{F_h}{A_z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

$$\delta = \frac{d_z}{D_z} = \frac{D_z - g_z}{D_z}$$

$$d_z = D_z - 2g_z$$

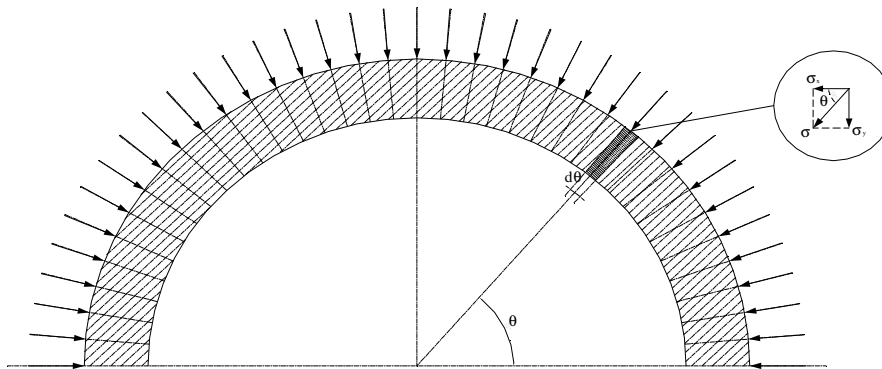
known form mechanics of materials equation for ring, stress tensor can be presented for this strain scheme as:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x = \frac{F_v}{A_h} & \tau_{xy} \approx 5.1 \frac{M_s}{D_z} \frac{1}{1-\delta^4} & 0 \\ \tau_{yx} \approx 5.1 \frac{M_s}{D_z} \frac{1}{1-\delta^4} & \sigma_y = \frac{F_v}{A_v} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z = \frac{F_h}{A_z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

where:

$$\delta = \frac{d_z}{D_z} = \frac{D_z - g_z}{D_z}$$

$$d_z = D_z - 2g_z$$



Rys. 2. Rozkład naprężenia obwodowego  $\sigma$  na powierzchni zewnętrznej przekroju poprzecznego chwilowej kotliny pielgrzymowej

Fig. 2. Circumferential stress distribution  $\sigma$  on a temporary working zone cross section outer surface

W niniejszej pracy składowe tensora naprężenia (2), odpowiadającego schematowi obciążenia A bez głowicy ZSN, wyznacza się eksperymentalnie z rozkładów sił walcowania, tj. nacisku metalu na walce  $F_v$  i siły osiowej w rurze  $F_h$  w zależności od drogi sań. Przyjmując uproszczenie, że nacisk metalu na walce (siła pionowa) rozkłada się równomiernie na obwodzie przekroju poprzecznego – tak jak to pokazano na rys. 2 – można po nieskomplikowanych przekształceniach wyliczyć składowe główne tensora naprężenia. I tak:

$$F_v = \frac{1}{2} \sigma_d r_z \int_0^\pi \sin 2\theta d\theta = \sigma_d D_z \quad (5)$$

a:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 = \sigma \sin \theta \\ \sigma_2 = \sigma \cos \theta \\ \sigma_3 = \frac{F_h}{A_z} \end{array} \right\} \quad (6)$$

In this paper, components of strain tensor (2) respondent to A strain scheme without VSS head, can be calculated experimentally from rolling forces distributions, metal pressure on rolls  $F_v$  and axial force in tube  $F_h$ , in relation to position of sledge. Simplifying, metal pressure on rolls (vertical force) distributes uniformly on cross section perimeter – as is shown on Fig. 2 – it is possible after some minor transformations, calculates main components of stress tensor:

$$F_v = \frac{1}{2} \sigma_d r_z \int_0^\pi \sin 2\theta d\theta = \sigma_d D_z \quad (5)$$

and:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 = \sigma \sin \theta \\ \sigma_2 = \sigma \cos \theta \\ \sigma_3 = \frac{F_h}{A_z} \end{array} \right\} \quad (6)$$

więc ostatecznie:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{F_v}{l_d D_z} \sin \theta \\ \sigma_2 &= \frac{F_v}{l_d D_z} \cos \theta \\ \sigma_3 &= \frac{F_h}{\pi(D_z - g_z)g_z} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Natomiast składowe tensora naprężenia (4), odpowiadającego schematowi obciążenia B z działaniem głowicy ZSN, wyznacza się eksperymentalnie z rozkładów sił walcowania  $F_v$  i  $F_h$  oraz momentu skręcającego  $M_s$  w funkcji drogi sań. Przy tym samym założeniu dotyczącym rozkładu naprężeń obwodowych ostatecznie otrzymuje się:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{F_v}{l_d D_z} \sin \theta \\ \sigma_2 &= \frac{F_v}{l_d D_z} \cos \theta \\ \sigma_3 &= \frac{F_h}{\pi(D_z - g_z)g_z} \end{aligned} \right\} @ \tau_{xy} \approx \tau_{yx} \approx 5.1 \frac{M_s}{D_z} \quad (8)$$

Do oceny odkształcalności granicznej dla różnych stanów naprężenia w chwilowej kotlinie pielgrzymowej zastosowano, podobnie jak w [2, 8], wykres stanu mechanicznego Pelczyńskiego [9]. Dla wybranego stanu naprężenia wykres ten w układzie współrzędnych  $\sigma_m, \sigma_H$  wymaga wykreślenia trzech prostych (rys. 3), o równaniach:

— prosta (A) o równaniu  $\sigma_H = \xi \sigma_m$  przechodząca przez początek układu współrzędnych o współczynniku kierunkowym

$$\xi = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_H}{\sigma_m}.$$

Na tej prostej leży punkt P określający stan naprężenia w chwilowej kotlinie pielgrzymowej, którego położenie zależy od wielkości obciążenia. Wg koncepcji Pelczyńskiego ten stan naprężenia opisany jest trzema wielkościami, a mianowicie:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (9)$$

gdzie wskaźnik Lodego:

finally:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{F_v}{l_d D_z} \sin \theta \\ \sigma_2 &= \frac{F_v}{l_d D_z} \cos \theta \\ \sigma_3 &= \frac{F_h}{\pi(D_z - g_z)g_z} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

While strain tensor components (4), responded to B strain scheme with VSS head, can be obtained experimentally from rolling forces distribution  $F_v$  i  $F_h$  and from torque moment  $M_s$  in equation with the position of ledge. With the same assumption concerns circumferential stress distribution, finally we receive:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{F_v}{l_d D_z} \sin \theta \\ \sigma_2 &= \frac{F_v}{l_d D_z} \cos \theta \\ \sigma_3 &= \frac{F_h}{\pi(D_z - g_z)g_z} \end{aligned} \right\} @ \tau_{xy} \approx \tau_{yx} \approx 5.1 \frac{M_s}{D_z} \quad (8)$$

To evaluate maximum formability for different strain states in temporary working zone, like in [2, 8], Pelczynski concept was applied [9]. For chosen strain state, diagram in  $\sigma_m, \sigma_H$  coordinate system needs to draw three straight lines (Fig. 3) with equations:

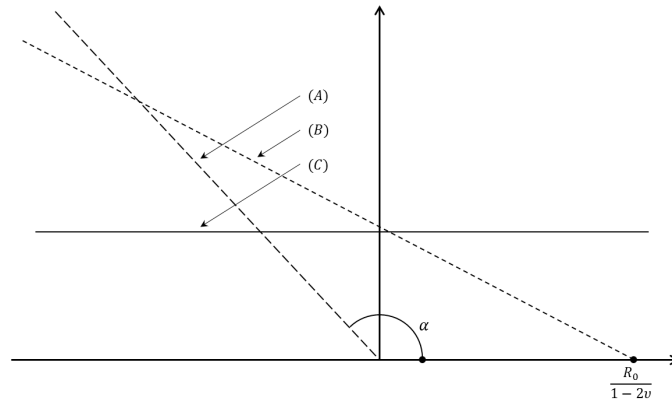
— line (A) with equation  $\sigma_H = \xi \sigma_m$  going through coordinate system center, with a slope of a straight line

$$\xi = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_H}{\sigma_m}.$$

On this line is point P, defining strain state in temporary working zone, witch magnitude is related to load. Due to a Pelczynski concept, those strain state is described by three values:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (9)$$

where Lodegy indicator:



Rys. 3. Wykres stanu mechanicznego Pelczyńskiego

Fig. 3. Pelczyński mechanical state diagram

— prosta (B) o równaniu

$$\sigma_H = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{1}{\cos \varphi} \left[ \frac{R_0}{1-2\nu} - \sigma_m \right]$$

i współczynnikiem kierunkowym

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{1}{\cos \varphi},$$

przecina oś  $\sigma_m$  w punkcie

$$\sigma_m = \frac{R_0}{1-2\nu}$$

i przedstawia wytrzymałość rozdzielczą, przekroczenie której powoduje kruche pęknięcie materiału,

— prosta (C) o równaniu  $\sigma_H = \sigma_{pl}$  określa wielkość naprężenia uplastyczniającego. Przekroczenie tej granicy powoduje przejście materiału w stan plastyczny.

Punkty przecięcia prostych (A) i (B) oraz (A) i (C) wyznaczają dwa stany krytyczne:

— punkt Q będący punktem przecięcia prostych (A) i (B) o współrzędnych:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{mQ} &= \frac{R_0}{1-2\nu} \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} \\ \sigma_{HQ} &= \frac{R_0}{1-2\nu} \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} \right) \operatorname{tg} \beta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

określa odkształcalność graniczną materiału. Tak wyliczone z (10)  $\sigma_{mQ}$ ,  $\sigma_{HQ}$  oraz  $\cos \varphi_\sigma$  z (9) opisują graniczny stan naprężenia w chwilowej kotlinie odkształcenia, w którym powstanie złom rozdzielczy, czyli pojawią się kruche pęknięcia,

— punkt R będący punktem przecięcia prostych (A) i (C) o współrzędnych:

— line (B) with equation

$$\sigma_H = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{1}{\cos \varphi} \left[ \frac{R_0}{1-2\nu} - \sigma_m \right]$$

and, with a slope of a straight line

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \frac{1}{\cos \varphi},$$

cross a axis  $\sigma_m$  in

$$\sigma_m = \frac{R_0}{1-2\nu}$$

point and it represents cohesive strength, brake through causes material brittle fracture,

— line (C) with equation  $\sigma_H = \sigma_{pl}$  determines yield stress magnitude. Crossing this limit indicates plastic state of material.

Points where lines (A) and (B) or (A) and (C) intersects, indicates critical states:

— point Q where lines (A) and (B) intersects with coordinates:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{mQ} &= \frac{R_0}{1-2\nu} \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} \\ \sigma_{HQ} &= \frac{R_0}{1-2\nu} \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} \right) \operatorname{tg} \beta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

indicates material maximum deformation. So calculated form (10)  $\sigma_{mQ}$ ,  $\sigma_{HQ}$  and  $\cos \varphi_\sigma$  from (9) describes maximal strain state in temporary working zone, in which material will fracture.

— point R where lines (A) i (C) intersects with coordinates:



$$\left. \begin{aligned} \sigma_{mpl} &= \frac{\sigma_{pl}}{\operatorname{tg} \alpha} \\ \sigma_{Hpl} &= \sigma_{pl} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

przedstawia moment rozpoczęcia odkształcenia plastycznego. Wartości  $\sigma_{mpl}$ ,  $\sigma_{Hpl}$  wyznaczone z (11) i  $\cos \varphi_{\sigma}$  z (9) opisują stan naprężenia w momencie przejścia materiału w stan plastyczny.

Wobec liniowej zależności między  $\sigma_m$  a  $\sigma_H$  na prostej obciążenia (A) można przyjąć, że w takim samym stosunku będą się zmieniać siły walcowania. Wobec tego ich wielkość nacisku metalu na walce w punkcie przecięcia prostych (A) i (B), a więc w momencie powstawania kruchych pęknięć, wyniesie:

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{\sigma_{mQ}}{\sigma_{mP}} = \frac{\sigma_{HQ}}{\sigma_{HP}} = \frac{F_{vQ}}{F_{vP}} \\ F_{vQ} &= rF_{vP} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Przyjmując z dużym przybliżeniem, że nacisk metalu na walce  $F_v$  zależy od pierwiastka posuwu  $m$ , co odpowiada wartości przemieszczenia liniowego  $m\lambda_{cP}$ :

$$\left. \begin{aligned} m_Q &\approx m_p r^2 \\ m_Q \lambda_{cQ} &\approx m_p \lambda_{cP} r^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Wyniki badań sił walcowania w nowym procesie pielgrzymowym mogą być wykorzystane do wyznaczenia odkształcalności granicznej wg przedstawionej wyżej koncepcji Pelczyńskiego. W przypadku walcowania bez używania głowicy ZSN można wyznaczyć z (2) naprężenia główne  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , i  $\sigma_3$  i wyliczyć z powyższych zależności  $\sigma_{mQ}$  i  $\sigma_{HQ}$  określające maksymalny stan naprężenia, jaki można uzyskać w tym procesie, bez obawy pojawienia się kruchych pęknięć na powierzchni rur gotowych. Natomiast w przypadku użycia głowicy ZSN wyniki pomiarów pozwalają wyznaczyć z (4) składowe stanu naprężenia  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  i  $\tau_{xy}$ . Wymaga to uprzedniego wyznaczenia naprężeń głównych. W tym celu można np. skorzystać ze znanej z teorii sprężystości i plastyczności metody [9], dalsze postępowanie będzie identyczne. Wyznaczona w ten sposób odkształcalność graniczna odpowiada stanowi naprężenia w chwilowej kotlinie pielgrzymowej znajdującej w aktualnym położeniu sań z. Dlatego badanie nowego procesu walcowania piel-

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{mpl} &= \frac{\sigma_{pl}}{\operatorname{tg} \alpha} \\ \sigma_{Hpl} &= \sigma_{pl} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

represents moment of plastic flow initialization. Values  $\sigma_{mpl}$ ,  $\sigma_{Hpl}$  calculated from (11) and  $\cos \varphi_{\sigma}$  from (9) describes strain state in moment when material is crossing plastic state.

Due to the linear relationship between  $\sigma_m$  and  $\sigma_H$  on the load line (A), it can be assumed, that in the same proportion, rolling forces will change. So metal pressure on the rolls, in the line crossing point (A) and (B) – when the fracture occurs – will be:

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{\sigma_{mQ}}{\sigma_{mP}} = \frac{\sigma_{HQ}}{\sigma_{HP}} = \frac{F_{vQ}}{F_{vP}} \\ F_{vQ} &= rF_{vP} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Assuming by far approximation the pressure of metal on the rolls  $F_v$  depends on the advance  $m$ , which is in correlation with linear displacement  $m\lambda_{cP}$ :

$$\left. \begin{aligned} m_Q &\approx m_p r^2 \\ m_Q \lambda_{cQ} &\approx m_p \lambda_{cP} r^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Results of research in the new pilger rolling process can be used to maximum formability calculation, presented before due to the Pelczynski conception. In the case when VSS head isn't present, using (2), principal stresses  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , i  $\sigma_3$  and maximum stress state  $\sigma_{mQ}$  i  $\sigma_{HQ}$  which can be achieved in process can be calculated, without any fractures on the tube surface. On the other hand, when the VSS head is present, measurement results and equation (4) allows calculating components of the stress state  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  and  $\tau_{xy}$ . Of course principal stresses had to be calculated before. To do this theory of elasticity and plasticity can be used [9], rest calculation will be similar as previous. Calculated by this way maximum formability, will corresponds to stress state in the temporary working zone, due to the sledge z position. So analysis of the new pilger rolling process requires stress state analysis in a number sledge position, and the final re-

grzymowego wymagać będzie analizy stanu naprężenia w kilku (kilkunastu) położeniach sań, a ostateczny wynik będzie równy najmniejszej uzyskanej w tej analizie wartości  $\sigma_{mQ}$  i  $\sigma_{HQ}$ . Potem pozostaje wyliczenie z (12) i (13) maksymalnych wartości  $Fv_Q$ ,  $m_Q$  i  $m_Q\lambda_{cQ}$ .

### 3. WYNIKI BADAŃ, ICH OPRACOWANIE I ANALIZA

Wyznaczenie wartości granicznego współczynnika cząstkowych odkształceń w próbie walcowania rur na zimno w walcierce pielgrzymowej wymagałoby przeprowadzenia bardzo kosztownego i ryzykownego eksperymentu. Przeprowadzanie takiej próby w rzeczywistych warunkach nie zawsze kończy się wyznaczeniem granicznego posuwu, przy którym następuje zniszczenie materiału. Zwiększanie tego parametru powoduje wzrost sił walcowania, co może doprowadzić do przekroczenia wartości dopuszczalnych dla walcarki, powodując awarię. Ponadto nadmierny posuw może wywołać zawalcowanie, co także uniemożliwi wyznaczenie  $n_{dmin}$ . Dlatego we wcześniejszych badaniach [2, 3] zastosowano metodę jego wyznaczania przy pomocy wykresu stanu mechanicznego Pelczyńskiego, a składowe stanu naprężenia wyznaczone były ze wzorów teoretycznych. W niniejszej pracy (zob. poprzedni rozdział) zaproponowano dokładniejszą metodę, w której własności mechaniczne walcowanego materiału zostały wyznaczone z próby rozciągania albo ściskania, a składowe tensora naprężenia z wyników pomiarów rozkładu sił walcowania na drodze sań. Dla przykładu wybrano nowy proces walcowania rur aluminiowych wg programu  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$  w modelowej walcierce pielgrzymowej wyposażonej w głowicę ZSN. Wprawdzie w rzeczywistych warunkach klasycznego procesu pielgrzymowego w przypadku walcowania rur z Al i jego stopów występuje jeszcze dodatkowe ograniczenie wydajności, a mianowicie z uwagi na konieczność użycia, jako smaru oleju mineralnego nie można odprowadzić wydzielanego ciepła odkształcenia. Ogranicza to wielkość posuwu  $m$  i współczynnika wydłużenia  $\lambda_c$ , a więc przemieszczenia liniowego  $m\lambda_c$  poniżej wielkości granicznych wynikających z (1). Z uwagi na małą prędkość ruchu

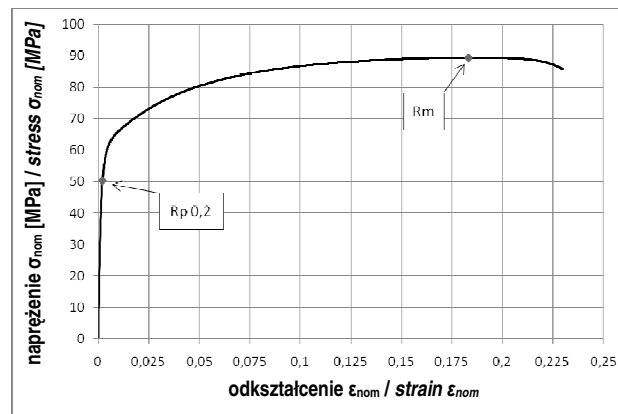
*sult will be equivalent of the smallest value of  $\sigma_{mQ}$  and  $\sigma_{HQ}$ . Then  $Fv_Q$ ,  $m_Q$  and  $m_Q\lambda_{cQ}$  values have to be calculated from the equations (12) and (13).*

### 3. THE RESULTS OF THE RESEARCH AND ANALYSIS

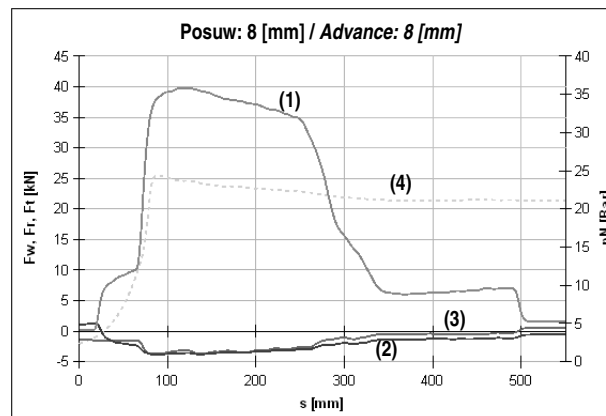
*Determination the value of partial strains maximum factor in the cold pilger rolling test requires expensive and quite risky experiment. Performing this test in the real conditions not always gives the value of the maximum advance, when the material fractures. Higher value of this parameter causes higher rolling forces, which can lead to cross the maximal strengths for the roller and induce roller breakdown. Moreover, too big advance can causes cold shuts, and  $n_{dmin}$  determination is unlikely then. That is why, in the earlier investigations [2, 3], the method of its determination by means of Pelczyński diagram of mechanical state, and the components of the strain state have been found from the theoretical formulas. The present paper (see the previous section), a more precise methods is proposed, in which the mechanical properties of the material being rolled have been determined in a tensile or compression test and the components of the stress tensor have been determined from the results of the measurement of the rolling force distribution on the slide path. As an example, the new process of rolling aluminium tubes according to the program,  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$ , in a model pilger rolling mill provided with the VSS head. For the example calculation, new cold pilger rolling program  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$  was chosen. In actual conditions of a classic pilger rolling of tubes of Al and its alloys, an additional productivity limit occurs: due to the necessity of the use of mineral oil as lubricant, the generated heat of deformation cannot be dissipated. It limits the amount of advance  $m$  and elongation factor  $\lambda_c$  and linear displacement  $m\lambda_c$  as well, due to the limited values came from (1). Because of low speed of the sledge and small amount of linear displacement, in this case there*

sań i niedużego przemieszczenia liniowego w analizowanym przypadku walcowania nie ma takiego ograniczenia. Na rys. 4 przedstawiono krzywą naprężenie–odkształcenie rozciąganej rury aluminiowej (a) oraz rozkład sił walcowania bez stosowania głowicy ZSN rur aluminiowych 45.7 x 4.5 → 24.7 x 1.12 w funkcji drogi sań (b). Pozostałe dane zamieszczono w tab. 1. Po podstawieniu tych danych do (2) i wykonaniu obliczeń z zależności (8)–(13) sporządzono wykres Pelczyńskiego dla trzech położzeń sań  $z = 100, 200$  i  $300$  mm, który przedstawiono na rys. 5.

is no that restriction. On the Fig. 4, stress-strain curve acquire from tensile test (a), and rolling forces distribution, without VSS head (b) are presented. Rest results are shown in Tab. 1. When those data are put into (2), and after calculation (8) to (13), Pelczynski diagram can be graphed, for the sledge  $z$  position equal  $z = 100, 200$  i  $300$  mm (Fig. 5).



a)



b)

- (1) – nacisk metalu na walce -  $F_w$   
metal pressure -  $F_w$
- (2) – siła osiowa w rurze -  $F_r$   
axial tube force -  $F_r$
- (3) – siła osiowa w trzpieniu –  $F_t$   
axial mandrel force –  $F_t$
- (4) – ciśnienie w układzie hydraulicznym –  $p_N$   
oil pressure -  $p_N$

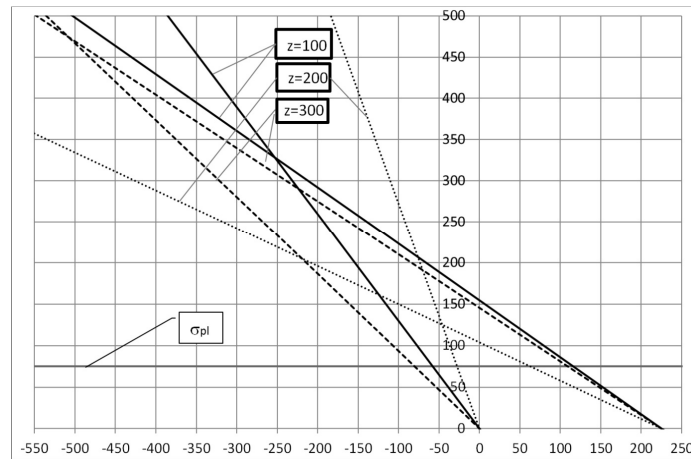
Rys. 4. Krzywa naprężenie – odkształcenie rozciąganej próbki aluminium (a) i rozkład sił walcowania pielgrzymowego rur Al w zależności od drogi sań (b)

Fig. 4. Stress-strain curve acquire from tensile test (a) and forces distribution in aluminium tubes dependent on the ledge position (b)

Tab. 1. Dane do obliczeń składowych stanu naprężenia w nowym procesie walcowania pielgrzymowego rur aluminiowych 45.7 x 4.5 → 24.7 x 1.12 z posuwem  $m=3$  mm

Tab. 1. The data for the calculation of the stress state components in the new pilger rolling process of aluminium tubes; rolling program 45.7 x 4.5 → 24.7 x 1.12 advance  $m=3$  mm

$z$	$D_t$	$D_z$	$g_z$	$\epsilon$	$\sigma_{pl}$	$\delta$	$\lambda_c$	$\epsilon_c$	$D$	$\nu$	$R_m$	$m_t$	$\sigma_v$
100.0	28.811	32.390	1.911	0.680	78.0	0.941							
200.0	24.428	26.456	1.410	0.806	82.0	0.947	7.176	0.861	120	0.3	90.0	0.8	225.0
300.0	22.630	24.757	1.080	0.860	83.0	0.956							



Rys. 5. Wykres stanu mechanicznego Pełczyńskiego dla nowego procesu walcowania rury aluminiowej  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$  z posuwem  $m=3$  mm (przy ruchu w tył w  $z = 100, 200$  i  $300$  mm)

Fig. 5. Pełczyński mechanical state diagram for aluminium tubes rolling in the program  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$  and with advance  $m=3$  m, for the sledge position  $z = 100, 200$  and  $300$  mm

Podobnie przeprowadzono dwukrotnie badania tego procesu przy użyciu głowicy ZSN, przykładając do rury wsadowej, w pierwszym przypadku, moment skręcający  $M=20$  Nm przyłożony w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, a w drugim przeciwnie. Wszystkie uzyskane wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 6 i w tab. 2. Dla uproszczenia na rys. 5 i 6 nie uwzględniono umocnienia metalu, przyjmując w przybliżeniu, że:

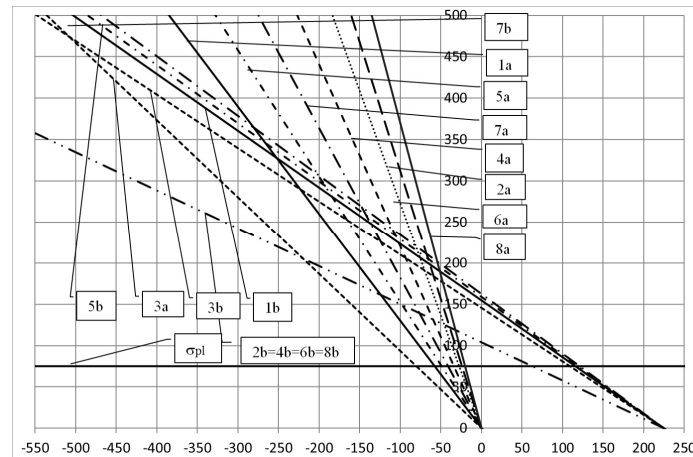
$$\sigma_{plz} = 10_0 \cong \sigma_{plz} = 20_0 \cong \sigma_{plz} = 30_0 \cong \frac{\sigma_{plz} = 10_0 + \sigma_{plz} = 20_0 + \sigma_{plz} = 30_0}{3}$$

W przypadku walcowania pielgrzymowego rur z aluminium i jego stopów w warunkach przemysłowych [8] (a więc przy dużo większych prędkościach walcowania niż w walcierce modelowej) ograniczeniem maksymalnego przemieszczenia liniowego jest brak możliwości odprowadzenia ciepła odkształcenia. Z uwagi na natychmiastową korozję powierzchni rur gotowych walcowanie musi odbywać się tylko przy użyciu jako smaru olei mineralnych będących produktem destylacji niskich frakcji ropy naftowej. W praktyce nawet przy małych prędkościach walcowania rzędu  $n = 60 - 90$  sk/min (a więc w walcarkach wolnobieżnych) osiągnięcie posuwu  $m = 7$  mm przy współczynniku wydłużenia ok  $\lambda_c = 6.5$  po kilku minutach pracy zachodzi konieczność zatrzymania walcarki z uwagi na możliwość zapłonu oleju.

Similar calculations was performed for the process with VSS head, when torque moment  $M=20$  Nm was applied to the tube in the clockwise and counter clockwise direction. Complete data was presented on the Fig. 6 and in the Tab. 2. For the simplification, on the Figs. 5 and 6, metal strengthening wasn't take into a consideration, approximately assuming that:

$$\sigma_{plz} = 10_0 \cong \sigma_{plz} = 20_0 \cong \sigma_{plz} = 30_0 \cong \frac{\sigma_{plz} = 10_0 + \sigma_{plz} = 20_0 + \sigma_{plz} = 30_0}{3}$$

In the case when tubes are rolled in the industrial conditions [8] (so as when tube rolling speed is much higher than in laboratory pilger mill) limitation of the maximum linear displacement is the inability to dissipate heat deformation. Due to the immediate surface corrosion of rolled tubes, rolling must be done only by using a mineral oils lubricant that is the product of the distillate petroleum low fractions. In practice, even at low rolling speeds when  $n = 60 - 90$  strokes/minute (so in slow running rollers) with advance  $m = 7$  mm and when elongation coefficient  $\lambda_c=6.5$ , after few minutes, roller has to be stopped, due to the possibility of the oil ignition.



Rys. 6. Wykres stanu mechanicznego Pelczyńskiego dla nowego procesu walcowania rury aluminiowej  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$  (przy ruchu w tył w  $z = 100, 200$  i  $300$  mm) uzyskane bez głowicy ZSN oraz przyłożeniem momentu skręcającego  $M_s = \pm 20 \text{ Nm}$  (oznaczenia cyfrowe prostych zgodnie z tablicą 2, a – proste obciążenia, b – proste złomu rozdzielczego)

Fig. 6. Pelczynski mechanical state diagram for the aluminium tube rolling in the program  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$  and with advance  $m=3$  m, for the sledge position  $z = 100, 200$  i  $300$  mm; rolling was performed with and without VSS head, and with torque moment  $M_s = \pm 20 \text{ Nm}$  (straight numerals as in table 2, a – load lines, b – scrap distribution lines)

Tab. 2. Wyniki obliczeń odkształcalności granicznej w nowym procesie walcowania pielgrzymowego rur aluminiowych  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$  z posuwem  $m=3$  mm

Tab. 2. Data, for the calculation of the maximum deformation, in the new pilger rolling process; rolling program  $45.7 \times 4.5 \rightarrow 24.7 \times 1.12$  advance  $m=3$  mm

Lp	z	$F_h$	$F_v$	$M_x$	$\sigma_{m(P)}$	$\sigma_{H(P)}$	$\sigma_{m(Q)}$	$\sigma_{H(Q)}$	r	$F_Q$	$m_Q$	$m\lambda_{cQ}$
<b>Z głowicą ZSN / With VSS head</b>												
1	100	418.37	391.60	0.00	-146.96	78.00	-203.11	107.80	1.38	578.18	5.7	13.7
2	200	389.51	364.59	0.00	-195.82	82.00	-234.65	98.26	1.20	466.75	4.3	10.3
3	300	360.66	337.58	0.00	-109.29	83.00	-161.86	122.92	1.48	534.13	6.6	15.7
<b>Bez głowicy ZSN / Without ZSN head</b>												
4	100	130.41	173.08	178.63	-129.14	78.00	-211.16	127.54	1.64	213.23	8.0	19.2
5	200	86.94	150.00	154.82	-158.15	82.00	-226.16	117.26	1.43	124.33	6.1	14.7
6	300	43.47	126.92	131.00	-95.47	83.00	-161.29	140.22	1.69	73.44	8.6	20.5
7	100	300.01	173.08	198.10	-129.14	78.00	-211.16	127.54	1.64	490.55	8.0	19.2
8	200	200.00	150.00	171.69	-48.87	82.00	-101.99	171.12	2.09	417.38	13.1	31.3
9	300	100.00	126.92	145.28	-41.50	83.00	-88.88	177.77	2.14	214.18	13.8	32.9

Natomiast walcowanie w modelowej walcownicy pielgrzymowej odbywa się przy niewielkich prędkościach walcowania, a dodatkowo po każdym cyklu roboczym konieczna jest kilkuminutowa przerwa. Niestety dużym ograniczeniem jest mała moc napędu urządzenia oraz ograniczona wytrzymałość elementów klatki. Uniemożliwia to prowadzenie badań na innych materiałach, przede wszystkim takich jak miedź i jej stopy.

On the other hand, in the model pilger rolling mill, rolling is effected at low rolling speeds and, after each working cycle, a break of a couple of minutes is necessary. Unfortunately, a serious limitation is imposed by the low power of the machine drive and low strength of the cage elements. This prevents testing other materials, first of all such as copper and its alloys.

#### 4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

1. Przeprowadzone badania walcowania rur aluminiowych w modelowej walcarni pielgrzymowej potwierdzają korzyści w zastosowaniu nowego procesu pielgrzymowego. Przede wszystkim możliwość sterowania stanem naprężenia w chwilowej kotlinie odkształcenia pozwala na zwiększenie odkształcalności granicznej oraz zmniejszenia sił walcowania i energii. Dalsze badania powinny obejmować zastosowanie w tym procesie metody KOBO pozwalającej uzyskać materiały o innej mikrostrukturze i lepszych własnościach mechanicznych.
2. Zaproponowana w pracy koncepcja określenia odkształcalności granicznej opartej na wykresie stanu mechanicznego może być zastosowana do nowego procesu pielgrzymowego. Metoda ta może być wykorzystana do badań czynnika materiałowego, jako ograniczenia wydajności procesu walcowania rur w tym procesie.
3. Dalsze poznanie nowego procesu pielgrzymowego wymagać będzie szczegółowego badania drugiego czynnika ograniczenia wydajności, a mianowicie czynnika konstrukcyjnego. Będzie to wymagało eksperymentalnego określenia wpływu parametrów procesu na siły walcowania. Będzie to przedmiotem kolejnej publikacji.
4. Badania procesu wykonane w niniejszej pracy potwierdziły konieczność przeprowadzenia gruntownej modernizacji modelowej walcarki pielgrzymowej w kierunku zwiększenia mocy układu napędowego, wytrzymałości elementów klatki walcarki, prędkości walcowania oraz wyposażenia jej w głowicę KOBO.

#### PODZIĘKOWANIA

Badania przeprowadzone w niniejszej pracy zostały sfinansowane ze środków statutowych. Nr umowy: 11.11.180.655.

#### 4. CONCLUSIONS AND FINAL REMARKS

1. *Presented results from the aluminium tube rolling in the model pilger roller, confirms the benefits of using the new pilger rolling process. First of all, the possibility of controlling the state of stress in the temporary working zone, increases the formability, and reduces rolling forces and energy. Further research should contain KOBO method usage, which allows obtaining materials with different microstructure and improved mechanical properties.*
2. *Presented conception of maximum formability determination, based on Pelczynski concept, can be applied to new pilger rolling process. This method can be used to test the material factor as limit of the productivity of the tube rolling.*
3. *Further investigations of this process will require detailed examination of the second factor productivity constraints – the construction factor. This will require the experimental determination of the effect of process parameters on rolling force. This will be the subject of a further publication.*
4. *Research confirms that present model roller requires modernization of the roller drive. Roller should be equipped with KOBO head. The stiffness of the pilger stand and rolling speed have to be improve as well.*

#### ACKNOWLEDGEMENTS

*Work financed from statutory funds. Contract number: 11.11.180.655.*

**LITERATURA / REFERENCES**

- [1] Osika J. (i in.): *Walcarka pielgrzymowa do wytwarzania rur na zimno*. Patent RP nr PL 209443B1 – 30.09.2011.
- [2] Osika J.: *Odkształcalność graniczna w procesie pielgrzymowania rur na zimno*. *Rudy i Metale Nieżelazne* nr 11 (2001), s. 520–526.
- [3] Korbel A., Bochniak W.: *Method of plastic forming of materials*. US Patent No 5.737.959(1998).
- [4] Osika J., Palkowski H., Świątkowski K., Pocięcha D., Kula A.: *Analysis of material deformation during the new cold tube rolling process realized on the new generation of pilger mills*. *Archive of Metallurgy and Materials* vol.54 no. 4 (2009), s. 1239–1251.
- [5] Osika J. (i in.): Projekt międzynarodowy niewspółfinansowany nr 2834/N - DAAD/2008/0 pt. „Badanie płynięcia materiału w procesie walcowania pielgrzymowego rur na zimno”, 2011 – praca niepublikowana.
- [6] Osika J. (i in.): *Modelowanie fizyczne i matematyczne przestrzennych stanów odkształcenia i naprężenia w wielocyklicznych procesach wytwarzania rur*. Projekt naukowo badawczy nr 3 T08B 069 29, 2007 – praca niepublikowana.
- [7] Pocięcha D.: *Wyznaczanie optymalnych warunków odkształcenia w nowym procesie walcowania pielgrzymowego rur na zimno*. Praca doktorska, AGH Kraków 2012.
- [8] Osika J.: *Walcowanie rur na zimno w walcarkach pielgrzymowych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.
- [9] Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E.: *Przeróbka Plastyczna. Podstawy teoretyczne*. WGH „Śląsk”, Katowice 1986.

