



Analiza parametrów siłowo-energetycznych procesu plastycznego kształtowania segmentowego

Analysis of force and energy parameters of the segment forming process

Franciszek Grosman*

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 2.10.2017

Recenzja: 10.10.2017

Akceptacja: 15.12.2017

Streszczenie

W artykule opisano przebieg procesu segmentowego kształtowania plastycznego, który można zaliczyć do grupy procesów przyrostowego kształtowania plastycznego metali. Proces ten jest szczególnie korzystny dla wytwarzania elementów integralnych dla lotnictwa. Dla procesu kształtowania modelowego elementu integralnego przeprowadzono analizę parametrów siłowo-energetycznych dla dwóch sposobów jego realizacji:

- dla zadanej wielkości wgłębienia w pojedynczym przejściu rolek dociskowych (położenie płyty oporowej jest każdorazowo przemieszczane o wielkość zadanego wgłębienia),
- dla wymuszonej naciskiem prasy stałej prędkości przemieszczania płyty oporowej (w tym wariantcie odkształcania płyta oporowa jest przemieszczana suwakiem prasy).

Omówiono przeprowadzone pomiary siły i przemieszczeń występujących w procesie wykonywania modelowej odkuwki. Dokonano analizy rozkładu sił przenoszonych przez rolki dociskowe na segmenty narzędzi kształtujących. Określono wzajemne relacje pomiędzy ruchem rolek dociskowych a przemieszczeniem segmentów wgłębiających się w kształtowany materiał. Przeprowadzono obliczenia dla wyznaczonych doświadczalnie wielkości średnich nacisków jednostkowych uzyskanych w próbach wciskania pojedynczych segmentów w odkształcany materiał (stop Al). Wyznaczono rozkłady sił w elementach przenoszących siłę nacisku narzędzi na odkształcany materiał oraz obliczono pracę wykonaną przez siły składowe i pracę całkowitą. Dokonano porównania sił obliczonych dla obydwóch wariantów kształtowania i porównano te wartości z wielkościami sił wyznaczonymi eksperymentalnie w procesie kształtowania na prasie hydraulicznej wyposażonej w przyrząd do kształtowania segmentowego. Uzyskane rezultaty przedstawiono w formie graficznej i analitycznej.

Słowa kluczowe: kształtowanie przyrostowe, kształtowanie segmentowe, parametry siłowo-energetyczne, analiza teoretyczna

Article info

Received: 2.10.2017

Reviewed: 10.10.2017

Accepted: 15.12.2017

Abstract

This article describes the progression of the segment forming process, which can be considered part of the group of incremental metal forming processes. This process is particularly advantageous for manufacturing integral elements for the aviation industry. Analysis of the force and energy parameters of the process of forming a model integral element was conducted for two methods of its performance:

- for the set indent size in a single pass of pressure rolls (position of the resistance plate is moved by the set indent size in every instance),*
- for constant resistance plate movement speed forced by the pressure exerted by the press (in this deformation variant, the resistance plate is moved by the press slide).*

Measurements of forces and displacements occurring in the manufacturing process of the model forging are discussed. The distribution of forces carried by press rolls onto segments of forming tools was analyzed. Mutual relationships between the movement of press rolls

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 32 603 44 01; e-mail: franciszek.grosman@polsl.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 32 603 44 01; e-mail: franciszek.grosman@polsl.pl

and the displacement of segments indenting the formed material were determined. Calculations were carried out for experimentally determined values of mean unit pressing forces obtained in tests involving pressing individual segments into the deformed material (Al alloy). Force distributions in elements carrying the tools' pressing force onto the deformed material were determined, and the work performed by component forces and total work were calculated. A comparison of forces calculated for both forming variants was conducted, and these values were compared to the force values determined experimentally in the forming process performed on a hydraulic press equipped with a segment forming attachment. Obtained results are presented in graphical and analytical form.

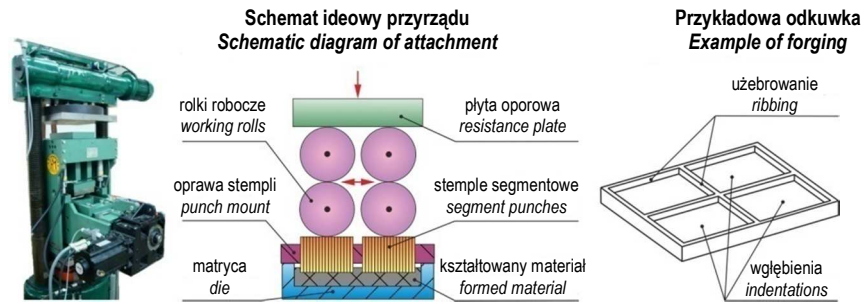
Keywords: *incremental forming process, segment forming process, force and energy parameters, theoretical analysis*

1. WPROWADZENIE

Procesy kształtowania przyrostowego [1–3] są przedmiotem intensywnych badań [4–12]. Istotą tych procesów jest rozłożenie, wymaganych dla uzyskania wyrobu o finalnym kształcie i wymiarach, odkształceń całkowitych na małe odkształcenia pojedyncze. Występujące w takich procesach zjawiska strukturalne i mechanizmy odkształcenia plastycznego istotnie różnią się od tych, które występują w procesach charakteryzujących się ciągłym, monotonicznym i proporcjonalnym przebiegiem odkształcenia [4–7]. Do tej grupy procesów można zaliczyć proces segmentowego kształtowania plastycznego (rys. 1), który nadaje się w sposób szczególny do wytwarzania elementów integralnych mających zastosowanie w przemyśle lotniczym. W artykule przedstawiono opis przebiegu procesu kształtowania przyrostowego, w którym zastąpienie dużego, monolitycznego stempla zestawem małych stempli segmentowych pozwala na istotne obniżenie niezbędnej siły nacisku prasy i średniego jednostkowego nacisku kształtowania [8, 11, 12, 14]. Przeprowadzono pomiary siły i przemieszczeń występujących w procesie wykonania modelowej odkuwki. Dokonano analizy rozkładu sił przenoszonych przez rolki dociskowe na segmenty narzędzi kształtujących. Określono wzajemne relacje pomiędzy ruchem rolek dociskowych a przemieszczeniem segmentów wgłębiających się w kształtowany materiał. Uzyskane rezultaty przedstawiono w formie graficznej i analitycznej.

1. INTRODUCTION

Incremental forming processes [1–3] are the subject of intensive research [4–12]. The essence of these processes is to distribute the total deformations required to obtain the final product over individual, small deformations. The structural phenomena and plastic deformation mechanisms occurring in these processes differ significantly from those present in processes characterized by a continuous, monotonic and proportional progression of deformation [4–7]. The segment forming process (Fig. 1) can be counted among this group of processes, and the process is particularly suitable for manufacturing integral elements that have applications in the aviation industry. This article presents a description of the progression of the incremental forming process, in which replacement of a large, monolithic punch with a set of small segment punches makes it possible to significantly reduce the required pressing force of the press and mean unit forming pressure [8, 11, 12, 14]. Measurements of forces and displacements occurring in the manufacturing process of the model forging were carried out. The distribution of forces carried by press rolls onto segments of forming tools was analyzed. Mutual relationships between the movement of press rolls and the displacement of segments indenting the formed material were determined. Obtained results are presented in graphical and analytical form.



Rys. 1. Stanowisko do badania procesu segmentowego kształtowania plastycznego oraz schemat ideowy przyrządu i przykładowa odkuwka

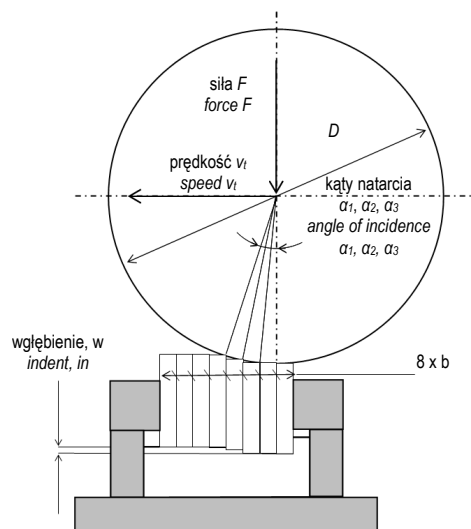
Fig. 1. Test station of the segment forming process, schematic diagram of the attachment and example of forging

2. ROZKŁAD SIŁ I KINETYKA RUCHU NARZĘDZI

Analizę rozkładu sił i kinetyki ruchu narzędzi można w uproszczeniu sprowadzić do rozpatrzenia układu segmentów i rolki pokazanym na rys. 2.

2. DISTRIBUTION OF FORCES AND KINETICS OF TOOL MOVEMENT

Analysis of the distribution of forces and kinetics of tool movement can be reduced, in simplification, to consideration of the system of segments and rolls shown in Fig. 2.



Rys. 2. Cechy geometryczne opisujące warunki kontaktu rolki z segmentami

Fig. 2. Geometrical features describing roll-segment contact conditions

Zależność pomiędzy średnią prędkością przemieszczania rolki w kierunku poziomym v_r a częstością ruchu posuwisto zwrotnego rolki f opisuje wzór:

$$v_r = \frac{2nb}{T} = 2nbf \quad (1)$$

gdzie: b – szerokość pojedynczego segmentu, n – liczba segmentów, f – częstotliwość ruchu posuwisto-zwrotnego rolki, T – czas pełnego ruchu posuwisto-zwrotnego rolki.

The dependency between the mean horizontal movement speed of the roll v_r and frequency of the roll's reciprocating motion f is described by the formula:

$$v_r = \frac{2nb}{T} = 2nbf \quad (1)$$

where: b – width of individual segment, n – number of segments, f – frequency of roll's reciprocating motion, T – complete cycle time of roll's reciprocating motion.

Prędkości liniowej przemieszczania rolki v_r odpowiada prędkość kątowna rolki:

$$\omega = \frac{v_r}{r} = \frac{2nbf}{r} = \frac{4nbf}{D} \quad (2)$$

Czas wglębnienia pojedynczego segmentu pod wpływem działania sił $F_n(t)$ zależy od prędkości przemieszczania rolki v_r i szerokości segmentu b . Dla stałej prędkości v_r jest on równy:

$$t_1 = \frac{b}{v_r} \quad (3)$$

Początkowy kąt natarcia rolki α_{i0} na krawędź i -tego segmentu można obliczyć z warunku geometrycznego:

$$\alpha_{0i} = \arcsin \frac{2ib}{D} \quad (4)$$

Kąt natarcia dla poszczególnych segmentów jest wielkością zmienną w funkcji czasu i w zależności od wielkości wglębnienia w_{poj} może obejmować tylko jeden lub równocześnie kilka segmentów.

Wielkość pojedynczego wglębnienia w_{poj} , zależnie od wariantu realizacji procesu, może być:

- zadana przez ustawienie płyty oporowej,
- wymuszona naciskiem prasy.

Dla wariantu drugiego wielkość wglębnienia zależy od prędkości ruchu stempla prasy v_{np} i prędkości przemieszczania rolki v_r . Obliczana jest z zależności:

$$w_{poj} = \int_0^T [v_{np}(t) + v_{nr}(t)] dt = \int_0^T [v_{np}(t) + v_r(t) \cdot \sin(\alpha_{0i} - \omega t)] dt \quad (5)$$

gdzie: v_{np} – prędkość ruchu stempla prasy, v_{nr} – składowa normalna prędkości spowodowana ruchem rolki, v_r – prędkość przemieszczania rolki, w_{poj} – wglębnienie przypadające na jedno przejście rolki, T – czas pełnego cyklu ruchu rolki (w obydwu kierunkach), ω – prędkość kątowna rolki, α_{0i} – kąt natarcia rolki na krawędź i -tego segmentu.

Dla fazy ruchu odpowiadającej przejściu rolki roboczej na kolejny segment narzędzia kształtującego kąt natarcia zmienia się zgodnie z zależnością:

$$\alpha_i = \alpha_{0i} - \alpha(t) = \alpha_{0i} - \omega t \quad (6)$$

Siłę składową, niezbędną dla poprzecznego przemieszczenia rolki, w warunkach nacisku stempla prasy lub płyty oporowej z siłą F_n , można obliczyć ze wzoru (rys. 3).

The linear movement speed of the roll v_r corresponds to the roll's angular speed:

$$\omega = \frac{v_r}{r} = \frac{2nbf}{r} = \frac{4nbf}{D} \quad (2)$$

The indentation time of a single segment under the action of force $F_n(t)$ depends on roll movement speed v_r and segment width b . For a constant speed v_r , it is equal to:

$$t_1 = \frac{b}{v_r} \quad (3)$$

Initial roll incidence angle α_{i0} onto the edge of the i -th segment can be calculated from geometric condition:

$$\alpha_{0i} = \arcsin \frac{2ib}{D} \quad (4)$$

The angle of incidence for individual segments is a variable quantity as a function of time, and depending on the indent size w_{ind} , may only apply to one or several segments simultaneously.

The size of an individual indent w_{ind} , depending on the variant of process performance, may be:

- set by the position of the resistance plate,
- forced by pressure from the press.

In the second variant, indent size depends on the movement speed of the press punch v_{np} and roll movement speed v_r . It is calculated using the dependency:

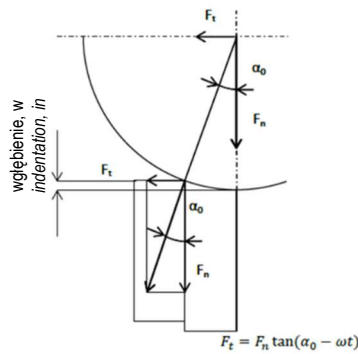
$$w_{poj} = \int_0^T [v_{np}(t) + v_{nr}(t)] dt = \int_0^T [v_{np}(t) + v_r(t) \cdot \sin(\alpha_{0i} - \omega t)] dt \quad (5)$$

where: v_{np} – movement speed of press punch, v_{nr} – normal speed component effected by roll movement, v_r – roll movement speed, w_{ind} – indent corresponding to one roll pass, T – time of complete roll movement cycle (in both directions), ω – angular speed of roll, α_{0i} – roll's angle of incidence onto the edge of the i -th segment.

For the movement phase corresponding to the transition of the working roll to the next segment of the forming tool, the angle of incidence changes according to the dependency:

$$\alpha_i = \alpha_{0i} - \alpha(t) = \alpha_{0i} - \omega t \quad (6)$$

The force component required for transverse roll movement, under conditions where the press punch or resistance plate applies force F_n , can be calculated from the formula (Fig. 3).



Rys. 3. Schemat rozkładu siły oddziaływania rolki na segment
 Fig. 3 Diagram of the distribution of force applied by the roll to the segment

$$F_t = F_n \tan(\alpha_{0i} - \omega t) \quad (7)$$

$$F_t = F_n \tan(\alpha_{0i} - \omega t) \quad (7)$$

Jeżeli zależna od wielkości wgłębienia siła nacisku $F_n(w)$ jest opisana, dla i -tego przedziału wgłębienia, funkcją aproksymującą (rys. 4):

If the indent size-dependent pressing force $F_n(w)$ is described, for the i -th indentation interval, then by approximation function (Fig. 4):

$$F_{ni}(w) = F_{n(i-1)} + k_i \cdot (w - w_{i-1}) \quad (8)$$

$$F_{ni}(w) = F_{n(i-1)} + k_i \cdot (w - w_{i-1}) \quad (8)$$

gdzie: k_i – współczynnik przyrostu siły dla i -tego przedziału wgłębienia, [kN/mm], w oraz w_{i-1} – odpowiednio wielkość bieżącego wgłębienia i wielkość wgłębienia sumarycznego uzyskanego po zakończeniu wgłębienia w przedziale $i-1$, [mm], to siła poprzeczna przemieszczająca rolkę jest opisana zależnością:

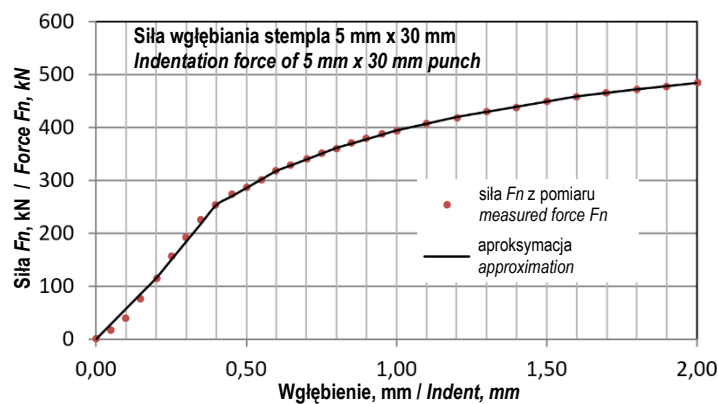
where: k_i – force increment coefficient for i -th indentation interval, [kN/mm], w and w_{i-1} – respectively, the size of the current indent and total indent size obtained after completion of indentation in interval $i-1$, [mm], then the transverse force moving the roll is described by dependency:

$$\begin{aligned} F_{ti} &= F_{ni}(t) \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t) = \\ &= [F_{n(i-1)} + k_i \cdot w_i(t)] \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t) = \quad (9) \\ &= \{F_{n(i-1)} + k_i \cdot [v_{npi}(t) + v_{nri}(t)] \cdot t\} \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{ti} &= F_{ni}(t) \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t) = \\ &= [F_{n(i-1)} + k_i \cdot w_i(t)] \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t) = \quad (9) \\ &= \{F_{n(i-1)} + k_i \cdot [v_{npi}(t) + v_{nri}(t)] \cdot t\} \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t) \end{aligned}$$

dla t mieszczącego się w przedziale $0 \leq t \leq t_1$. Dla stałego położenia płyty oporowej prędkość $v_{npi} = 0$.

for t within the interval $0 \leq t \leq t_1$. For a constant position of the resistance plate, speed $v_{npi} = 0$.



Rys. 4. Zależność siły nacisku F_n od wielkości wgłębienia płytki o wymiarach powierzchni czołowej 5 mm x 30 mm dla stopu Al
 Fig. 4. Dependency of pressing force F_n on indentation size of plate with face surface dimensions 5mm x 30 mm for Al alloy

Dla stałej wielkości pojedynczego wgłębienia (w jednym przejściu rolek) w_{poj} , w kolejnych przedziałach aproksymacji liniowej, wielkość siły wgłębienia dla i -tego przedziału wgłębienia wyrażona jest wzorem:

$$F_{ni}(w) = F_{n(i-1)} + k_i[w - (i-1) \cdot w_{poj}] \quad (10)$$

Pracę wykonaną przez siłę nacisku F_{ni} , dla odkształcania jednym segmentem dla i -tego przedziału, wyraża wzór:

$$L_{ni} = w_{poj} \cdot F_{n(i-1)} + k_{ni} \cdot \frac{w_{poj}^2}{2} \quad (11)$$

Całkowita praca wgłębienia jest równa sumie:

$$L_{nc} = \sum_{i=1}^n L_{ni} \quad (12)$$

Praca wykonana przez siłę przemieszczającą rolę w kierunku poziomym F_t jest równa pracy wykonanej przez siłę F_n powiększonej o pracę niezbędną dla pokonania sił tarcia tocznego.

$$L_{tc} = L_n + L_{tf} \quad (13)$$

Całkowita siła niezbędna do przemieszczania rolek dociskowych w kierunku osi x jest powiększona o opory tarcia tocznego, na które składają się siła tarcia tocznego górnej rolki o płytę oporową prasy, dolnej rolki o powierzchnię górną segmentów stempla (współczynnik oporu toczenia $f_p = 0,06$ mm) oraz tarcie toczne pomiędzy górną i dolną rolką (współczynnik oporu toczenia $f_r = 0,08$ mm).

Całkowita siła składowa F_{tc} jest sumą siły F_t , wynikającej z siły nacisku F_n , powodującej wgłębienie segmentu i siły oporu toczenia F_{tf} .

Dla fazy ruchu odpowiadającej atakowi rolki na krawędź segmentu siła ta jest równa:

$$\begin{aligned} F'_{tc} &= F'_t + F'_{tf} = F_n \tan(\alpha_0 - \alpha) + \frac{2F_n(f_p + f_r)}{D} = \\ &= F_n \tan(\alpha_0 - \omega t) + \frac{2F_n(f_p + f_r)}{D} \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie: F'_t – siła poprzeczna wynikająca z siły wgłębienia, F_n , F'_{tf} – siła oporów toczenia pomiędzy rolkami i rolki górnej o płytę oporową.

Dla fazy ruchu odpowiadającej przemieszczaniu rolki po płaskiej powierzchni segmentu siła niezbędna do pokonania oporów tarcia tocznego jest równa:

$$F''_{tc} = \frac{2F_n(2f_p + f_r)}{D} \quad (15)$$

For a constant size of an individual indent (in one roll pass) w_{inds} , in successive intervals of linear approximation, the value of the indentation force for the i -th indentation interval is expressed by the formula:

$$F_{ni}(w) = F_{n(i-1)} + k_i[w - (i-1) \cdot w_{poj}] \quad (10)$$

Work performed by pressing force F_{ni} , for deformation with one segment, for the i -th interval, is expressed by the formula:

$$L_{ni} = w_{poj} \cdot F_{n(i-1)} + k_{ni} \cdot \frac{w_{poj}^2}{2} \quad (11)$$

Total indentation work is equal to the sum:

$$L_{nc} = \sum_{i=1}^n L_{ni} \quad (12)$$

Work performed by the force moving the roll horizontally F_t is equal to the work performed by force F_n increased by the work required to surmount rolling friction forces.

$$L_{tc} = L_n + L_{tf} \quad (13)$$

The total force required to move press rolls over the x axis is increased by rolling friction resistance, which consists of the rolling friction force between the top roll and the press resistance plate and between the bottom roll and the top surface of punch segments (rolling resistance coefficient $f_p = 0.06$ mm) as well as rolling friction between the top and bottom rolls (rolling resistance coefficient $f_r = 0.08$ mm).

Total component force F_{tc} is the sum of force F_t , arising from pressing force F_n which causes indentation of the segment, and rolling resistance force F_{tf} .

For the movement phase corresponding to the roll's attack on the segment edge, this force is equal to:

$$\begin{aligned} F'_{tc} &= F'_t + F'_{tf} = F_n \tan(\alpha_0 - \alpha) + \frac{2F_n(f_p + f_r)}{D} = \\ &= F_n \tan(\alpha_0 - \omega t) + \frac{2F_n(f_p + f_r)}{D} \end{aligned} \quad (14)$$

where: F'_t – transverse force arising from indentation force, F_n , F'_{tf} – force of rolling resistance between rolls and between the top roll and resistance plate.

For the movement phase corresponding to roll movement over the flat surface of the segment, the force required to surmount rolling friction resistance is equal to:

$$F''_{tc} = \frac{2F_n(2f_p + f_r)}{D} \quad (15)$$

3. PARAMETRY SIŁOWO-ENERGETYCZNE DLA ZADANEJ WIELKOŚCI WGLĘBIENIA W POJEDYNCZYM PRZEJŚCIU ROLEK DOCISKOWYCH

W procesie kształtowania segmentowego, w którym wielkość wglębiania jest regulowana położeniem płyty oporowej, całkowita praca jest wykonana przez poziomą siłę F_t na drodze odpowiadającej sumie szerokości wszystkich segmentów (np. $6 \times 5 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$). Na całkowitą pracę składa się praca niezbędna do pokonania sił oporu tarcia toczonego i praca wglębiania segmentów wykonana przez siłę składową F_n . Pionowy ruch segmentu wymaga składowej siły F_n , która występuje w fazie ruchu rolki rozpoczynającej się od zetknięcia rolki z krawędzią segmentu, a kończy w momencie, kiedy współrzędna x środka obrotu walca pokrywa się ze współrzędną x krawędzi segmentu.

Parametry procesu plastycznego kształtowania segmentowego można podzielić na dwie grupy: parametry stałe wynikające z cech konstrukcyjnych urządzenia oraz parametry zmienne, ustalane przez technologa, wymagane dla uzyskania wyrobu o określonych cechach geometrycznych, własnościach użytkowych i strukturze materiału.

Dobieranymi przez technologa parametrami zmiennymi są: wielkość pojedynczego wglębiania w_{poj} (dla wariantu realizacji procesu zakładającego wymuszoną wielkość wglębiania), częstotliwość ruchu posuwistozwrotnego rolek dociskowych f . Wynikowa jest wielkość siły nacisku F_n .

Analiza wpływu parametrów procesu kształtowania segmentowego na parametry siłowo-energetyczne została przeprowadzona dla modelowej odkuwki o wymiarach zewnętrznych $75 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ z dwoma wglębieniami o powierzchni $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ każde (rys. 5), której wysokość uźebrowania usztywniającego wynosi 5 mm . Dla uzyskania takiej wysokości uźebrowania niezbędne jest wglębianie o wielkości $2,0 \text{ mm}$.

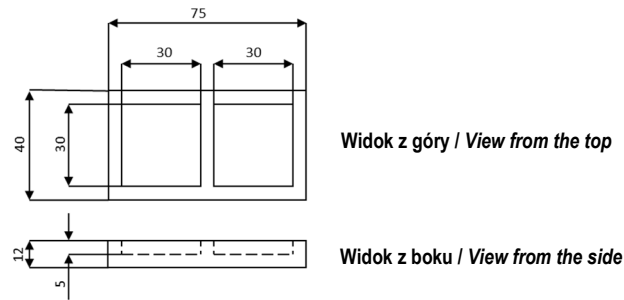
3. FORCE AND ENERGY PARAMETERS FOR SET INDENT SIZE IN SINGLE PRESS ROLL PASS

In the segment forming process, in which the indent size is adjusted by the position of the resistance plate, total work is performed by horizontal force F_t over the path corresponding to the sum of all segments' widths (e.g. $6 \times 5 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$). Total work consists of the work required to surmount rolling friction forces and the segment indentation work performed by force component F_n . Vertical movement of the segment requires a component of force F_n that occurs during the roll movement phase starting with the roll's contact with the segment edge and ending at the instant when the x coordinate of the cylinder's center of rotation aligns with the x coordinate of the segment edge.

The parameters of the segment forming process can be divided into two groups: constant parameters arising from the construction of the device and variable parameters defined by the process engineer required for obtaining a product with specific geometrical features, functional properties and material structure.

The variable parameters whose values are set by the process engineer are: size of single indent w_{ind} (for the variant of process performance assuming a forced indent size), frequency of reciprocal press roll movement f . The result is the value of pressing force F_n .

Analysis of the influence of segment forming process parameters on force and energy parameters was conducted for a model forging with exterior dimensions $75 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ with two indents, each with a surface area of $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ (Fig. 5), for which bracing ribbing height is 5 mm . An indent size of 2.0 mm is required to obtain such a ribbing height.



Rys. 5. Wymiary modelowego elementu integralnego

Fig. 5. Dimensions of model integral element

Do obliczeń przyjęto wielkość wgłębienia w pojedynczym przejściu rolek $w_{poj} = 0,2$ mm, co oznacza, że krawędź tylko jednego segmentu jest w kontakcie z rolką. W obliczaniu pracy niezbędnej do realizacji założonego odkształcenia przyjęto następujące wartości parametrów procesu: $f = 1$ Hz, $D = 100$ mm, $b = 5$ mm, maksymalny kąt natarcia $\alpha_0 = 0,0898$ rd, prędkość kątowna rolki $\omega = 1,2$ rd/s, prędkość liniowa rolki:

$$v_r = 60 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Wielkość siły nacisku, niezbędnej dla wgłębienia segmentu, zależy od właściwości kształtowanego materiału. Badania eksperymentalne i analiza teoretyczna wykonana została dla stopu Al. Wyznaczona eksperymentalnie zależność siły nacisku od głębokości wgłębienia stempla o wymiarach powierzchni czołowej 5 mm x 30 mm, jest pokazana na rys. 4. Funkcja przedstawiająca zależność siły nacisku od wgłębienia dla wielkości pojedynczego wgłębienia 0,2 mm może być, dla przedziałów równych pojedynczemu wgłębieniu, aproksymowana szeregiem zależności liniowych (rys. 4, zależność 10).

Siła F_{ti} , konieczna dla przemieszczenia rolek dociskowych wymuszających wgłębienie segmentu z siłą F_{ni} , dla i -tego przejścia, jest wyrażona zależnością:

$$F_{ti}(t) = [F_{n(i-1)} + k_i \cdot w_i(t)] \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t)$$

$$w_i(t) = \frac{D}{2} [\cos(\alpha_{0i} - \omega t) - \cos \alpha_{0i}] \quad (16)$$

$$F_{ti}(t) = \left\{ F_{n(i-1)} + k_i \left[\frac{D}{2} [\cos(\alpha_{0i} - \omega t) - \cos \alpha_{0i}] \right] \right\} \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t) \quad (17)$$

dla czasu zawartego w przedziale $0 \leq t \leq 0,089$ s.

$$F_{ti}(s) = \left\{ F_{n(i-1)} + k_i \left[\frac{D}{2} \left[\cos \left(\alpha_{0i} - \omega \frac{s}{v_r} \right) - \cos \alpha_{0i} \right] \right] \right\} \cdot \tan \left(\alpha_{0i} - \omega \frac{s}{v_r} \right) \quad (18)$$

An single-pass indent size of $w_{ind} = 0.2$ mm was adopted in calculations, meaning that only one segment's edge is in contact with the roll. The following process parameter values were adopted to calculate the work required to perform the assumed deformation: $f = 1$ Hz, $D = 100$ mm, $b = 5$ mm, maximum incidence angle angular speed of roll $\alpha_0 = 0,0898$ rd, p , angular speed of roll $\omega = 1,2$ rd/s, linear speed of roll:

$$v_r = 60 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

The value of pressing force required for segment indentation depends on the properties of the formed material. Experimental studies and theoretical analysis have been conducted for Al alloy. The experimentally determined dependency of pressing force on the indentation depth of a punch with face surface dimensions 5 mm x 30 mm, is shown in Fig. 4. This function, presenting the dependency of pressing force on indentation for a single indent size of 0.2 mm, can be approximated within intervals equal to an individual indent by a series of linear dependencies (Fig. 4, dependency 10).

The force F_{ti} required to move the press rolls forcing segment indentation with force F_{ni} , of the i -th pass, is expressed by the dependency:

$$F_{ti}(t) = [F_{n(i-1)} + k_i \cdot w_i(t)] \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t)$$

$$w_i(t) = \frac{D}{2} [\cos(\alpha_{0i} - \omega t) - \cos \alpha_{0i}] \quad (16)$$

$$F_{ti}(t) = \left\{ F_{n(i-1)} + k_i \left[\frac{D}{2} [\cos(\alpha_{0i} - \omega t) - \cos \alpha_{0i}] \right] \right\} \cdot \tan(\alpha_{0i} - \omega t) \quad (17)$$

for path within the interval $0 \leq t \leq 0,089$ s.

$$F_{ti}(s) = \left\{ F_{n(i-1)} + k_i \left[\frac{D}{2} \left[\cos \left(\alpha_{0i} - \omega \frac{s}{v_r} \right) - \cos \alpha_{0i} \right] \right] \right\} \cdot \tan \left(\alpha_{0i} - \omega \frac{s}{v_r} \right) \quad (18)$$

dla drogi mieszczącej się w przedziale $0 \leq s \leq b = 5$ mm.

Czas odpowiadający przemieszczeniu rolki na drodze równej szerokości segmentu $b = 5$ mm jest równy: $t_1 = 0,083$ s. Przebieg siły $F_{ii}(s)$ dla i -tego przejścia rolki, na drodze odpowiadającej szerokości jednego segmentu pokazany jest na rys. 6.

Dla fazy ruchu odpowiadającej atakowi rolki na krawędź segmentu, dla przemieszczenia rolki na drodze: $s' = 4,44$ mm, która dla prędkości przemieszczania rolki równej 60 mm/s odbywa się w czasie $t' = 0,0741$ s. Siła oporu tarcia tocznego rolki jest wyrażona zależnością:

$$F'_{t'fi}(t) = \frac{2F_{ni}(t) \cdot (f_p + f_r)}{D} = \frac{2[F_{n(i-1)} + k_i \frac{D}{2} [\cos(\alpha_{oi} - \omega t) - \cos \alpha_{oi}]] \cdot (f_p + f_r)}{D} \quad (19)$$

Dla fazy ruchu odpowiadającej przemieszczaniu rolki po powierzchni płaskiej na drodze $s'' = 0,556$ mm, odbywa się w czasie $t = 0,093$ s. Siła oporu tarcia tocznego rolki jest wyrażona zależnością:

$$F''_{t'fi} = \frac{2F_{ni_{max}}(2f_p + f_r)}{D} \quad (20)$$

Dla fazy przemieszczania rolek po powierzchni segmentów, dla wariantu kształtowania, w którym wielkość wgłębienia jest regulowana położeniem płyty oporowej, siła nacisku normalnego $F''_{t'fi}$ jest spowodowana sprężystym odkształceniem elementów przyrządu i narzędzi. Dla przeprowadzonych obliczeń przyjęto wartość siły nacisku występującą w końcowej fazie wtaczania na powierzchnię płaską $F_{ni_{max}}$.

Praca L_t wykonana przez siłę, przemieszczającą rolkę w kierunku poziomym, jest sumą pracy wykonanej dla wtoczenia rolki na powierzchnię płaską segmentu L'_t i pracy wykonanej w fazie toczenia rolki po powierzchni płaskiej segmentu L''_t : $L_t = L'_t + L''_t$. Dodatkowo praca ta jest powiększona o pracę konieczną dla pokonania oporów tarcia tocznego. Całkowita siła składowa F_{tc} jest sumą siły F_t , wynikającej z siły nacisku F_n powodującej wgłębienie segmentu i siły oporów toczenia $F_{t'f}$.

for path within the interval $0 \leq s \leq b = 5$ mm.

The time corresponding to roll movement over a path equal to segment width $b = 5$ mm amounts to: $t_1 = 0,083$ s. The progression of force $F_{ii}(s)$ for the i -th roll pass over the path corresponding to the width of a single segment is shown in Fig. 6.

For the movement phase corresponding to the roll's attack on the segment edge, for roll movement over path: $s' = 4,44$ mm, for a roll movement speed equal to 60 mm/s, movement occurs within time $t' = 0,0741$ s. The force of the roll's rolling friction resistance is expressed by dependency:

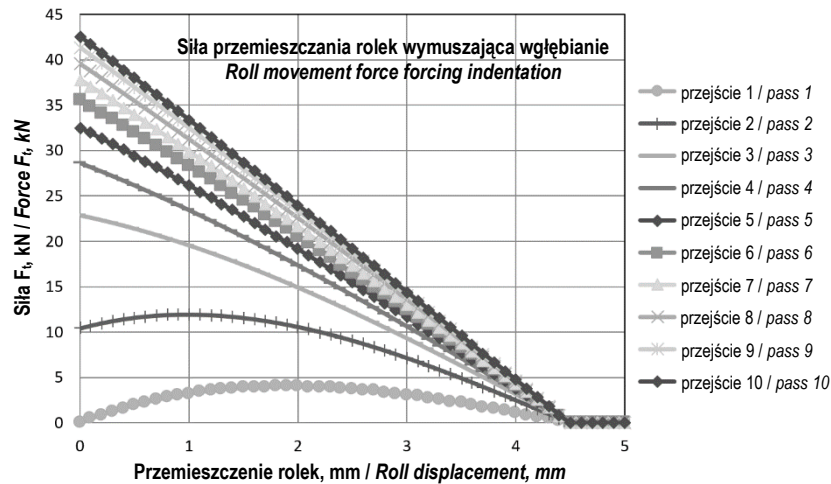
$$F'_{t'fi}(t) = \frac{2F_{ni}(t) \cdot (f_p + f_r)}{D} = \frac{2[F_{n(i-1)} + k_i \frac{D}{2} [\cos(\alpha_{oi} - \omega t) - \cos \alpha_{oi}]] \cdot (f_p + f_r)}{D} \quad (19)$$

For the movement phase corresponding to roll movement over a flat surface over path $s'' = 0.556$ mm, movement occurs within time $t = 0.093$ s. The force of the roll's rolling friction resistance is expressed by the dependency:

$$F''_{t'fi} = \frac{2F_{ni_{max}}(2f_p + f_r)}{D} \quad (20)$$

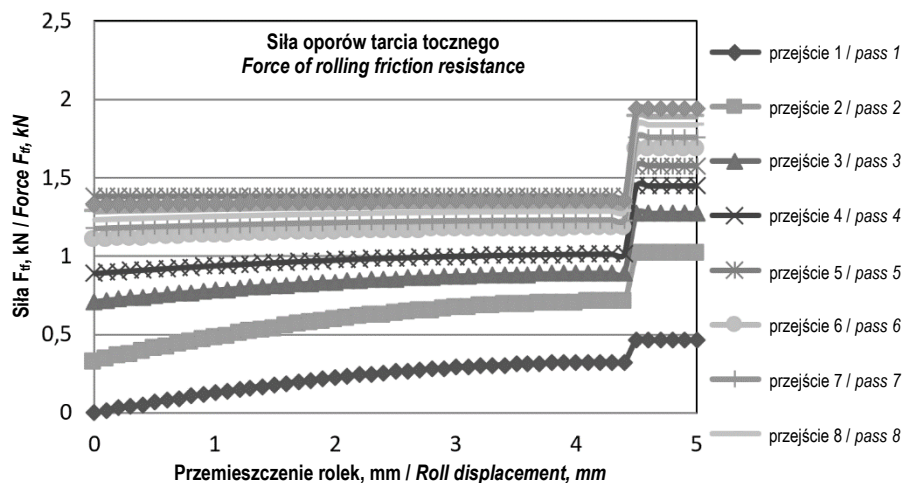
In the phase of roll movement over segments' surfaces, for the forming variant in which indent size is adjusted by the position of the resistance plate, normal pressing force $F''_{t'fi}$ originates from the elastic deformation of elements of the attachment and tools. The pressing force value occurring at the final phase of rolling onto the flat surface $F_{ni_{max}}$ was adopted in calculations.

Work L_t performed by the force moving the roll horizontally is the sum of the work performed to roll onto the segment's flat surface L'_t and the work performed during the phase of rolling over the segment's flat surface L''_t : $L_t = L'_t + L''_t$. In addition, this work is increased by the work required to surmount rolling resistance. Total component force F_{tc} is the sum of force F_t , arising from pressing force F_n which causes indentation of the segment, and rolling resistance force $F_{t'f}$.



Rys. 6. Pozioma siła F_t składowa dla wgłębienia na drodze odpowiadającej szerokości jednego segmentu dla kolejnych przejść obliczona z zależności (18)

Fig. 6. Horizontal force F_t component for indentation over a path corresponding to the width of a single segment for successive passes was calculated from dependency (18)



Rys. 7. Siła oporów tarcia tocznego F_{tf} na drodze odpowiadającej szerokości jednego segmentu w kolejnych przejściach obliczona z zależności (19) i (20)

Fig. 7. Force of rolling resistance friction F_{tf} over path corresponding to the width of a single segment in successive passes, calculated from dependencies (19) and (20)

Praca wykonana przez zmienną siłę F_{tc} na drodze $s' = 4,444$ mm w czasie $t' = 0,0741$ s jest sumą pracy wykonanej dla wgłębienia segmentu i pokonania oporów tarcia tocznego:

$$L'_{tc} = L_t + L'_{tf} = L_n + L'_{tf} \quad (21)$$

Praca wykonana przez zmienną siłę F_{tc} na drodze $s'' = 0,556$ mm w czasie $t'' = 0,0096$ s jest pracą konieczną jedynie dla pokonania oporu tarcia tocznego.

The work performed by variable force F_{tc} over path $s' = 4.444$ mm over time $t' = 0.0741$ s is the sum of the work performed for segment indentation and surmounting rolling resistance:

$$L'_{tc} = L_t + L'_{tf} = L_n + L'_{tf} \quad (21)$$

The work performed by variable force F_{tc} over path $s'' = 0.556$ mm over time $t'' = 0.0096$ s is the work required just to surmount rolling resistance.

Tab. 1. Wartości współczynnika k_i , siły F_{ni} oraz pracy częściowej L_{ni} i całkowitej L_{nc} dla pojedynczego wgłębienia $w_{poj} = 0,2$ mm
 Tab. 1. Values of coefficient k_i , force F_{ni} and partial work L_{ni} and total work L_{nc} for single indent $w_{ind} = 0.2$ mm

1	Współczynnik, k_i Coefficient, k_i	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}
2	Przedział wgłębienia [mm] Indentation interval [mm]	0,0– –0,2	0,2– –0,4	0,4– –0,6	0,6– –0,8	0,8– –1,0	1,0– –1,2	1,2– –1,4	1,4– –1,6	1,6– –1,8	1,8– –2,0
3	Wartość współczynnika k_i [kN/mm] k_i coefficient value [kN/mm]	578	690	323	218	165	128	98	98	68	60
4	Siła maks. dla przedziału [kN] Max. force for interval [kN]	116	254	318	362	395	420	440	459	473	485
5	Praca wgłębienia [J] Indentation work [J]	11,5	36,9	57,1	67,9	75,6	81,4	85,9	89,8	93,1	95,7
6	Praca wykonana przez prasę [J] Work performed by press [J]	1,92	6,9	5,37	5,07	4,95	4,67	5,2	6,0	6,37	5,7
7	Praca wykonana przez rolkę [J] Work performed by roll [J]	9,63	30,0	51,8	62,8	70,7	76,7	81,2	85,2	89,4	94,2
8	Praca tarcia tocznego F'_{tf} [kN] Rolling friction work F'_{tf} [kN]	0,96	2,59	6,73	8,37	11,2	11,2	12,5	13,7	14,9	15,7
9	Praca tarcia tocznego F''_{tf} [kN] Rolling friction work F''_{tf} [kN]	0,26	0,56	0,71	0,80	0,88	0,93	0,98	1,02	1,05	1,08
10	Całkowita praca $L_c = L_{nc} + L'_{tf} + L''_{tf}$, [J] Total work $L_c = L_{nc} + L'_{tf} + L''_{tf}$, [J]	695,25 + 127,55 + 8,27 = 837,01									

Pracę wykonaną przez siłę nacisku F_{ni} dla odkształcania jednym segmentem w i -tym przejeździe rolki (tab. 1) wyraża wzór:

$$L_{ni} = w_{poj} \cdot F_{n(i-1)} + \int_0^{w_{poj}} k_i \cdot w \cdot dw = w_{poj} \cdot F_{n(i-1)} + k_i \cdot \frac{w_{poj}^2}{2} \quad (22)$$

Całkowita praca wgłębienia jest równa sumie (tab. 1): $L_{nc} = \sum_{i=1}^{10} L_{ni} = 695,25$ J.

Całkowita praca tarcia tocznego jest równa:

$$L_{tf} = L'_{tf} + L''_{tf} = \sum_{i=1}^{10} L'_{tfi} + \sum_{i=1}^{10} L''_{tfi} \quad (23)$$

$$L'_{tfi} = F'_{tfi}(s) \cdot \Delta s = \frac{2F_{ni}(s) \cdot (f_p + f_r) \cdot \Delta s}{D} \quad (24)$$

$$L''_{tfi} = F''_{tfi} \cdot (b - s') = \frac{2F_{ni}(2f_p + f_r) \cdot (b - s')}{D} \quad (25)$$

Wykonane obliczenia dały następujące wyniki: $L'_{ft} = 127,55$ J, $L''_{ft} = 8,27$ J. Całkowita praca tarcia tocznego jest równa: $L_{ft} = 135,82$ J, co stanowi 6,2% całkowitej pracy niezbędnej dla realizacji procesu kształtowania segmentowego.

Work performed by pressing force F_{ni} , for deformation with one segment, for the i -th roll pass (Tab. 1), is expressed by the formula:

$$L_{ni} = w_{poj} \cdot F_{n(i-1)} + \int_0^{w_{poj}} k_i \cdot w \cdot dw = w_{poj} \cdot F_{n(i-1)} + k_i \cdot \frac{w_{poj}^2}{2} \quad (22)$$

Total indentation work is equal to the sum (Tab. 1): $L_{nc} = \sum_{i=1}^{10} L_{ni} = 695,25$ J.

Total rolling friction work is equal to:

$$L_{tf} = L'_{tf} + L''_{tf} = \sum_{i=1}^{10} L'_{tfi} + \sum_{i=1}^{10} L''_{tfi} \quad (23)$$

$$L'_{tfi} = F'_{tfi}(s) \cdot \Delta s = \frac{2F_{ni}(s) \cdot (f_p + f_r) \cdot \Delta s}{D} \quad (24)$$

$$L''_{tfi} = F''_{tfi} \cdot (b - s') = \frac{2F_{ni}(2f_p + f_r) \cdot (b - s')}{D} \quad (25)$$

Calculations yielded the following results: $L'_{ft} = 127.55$ J, $L''_{ft} = 8.27$ J. Total rolling friction work is equal to: $L_{ft} = 135.82$ J, which constitutes 6.2% of the total work required to perform the segment forming process.

4. PARAMETRY SIŁOWO-ENERGETYCZNE DLA WYMUSZONEJ NACISKIEM PRASY STAŁEJ PRĘDKOŚCI PRZEMIESZCZANIA PŁYTY OPOROWEJ

Wariant kształtowania plastycznego, w którym wymuszony jest ruch płyty oporowej przez siłę nacisku prasy wymaga uwzględnienia dwóch aktywnych źródeł dostarczania energii: pracy wykonanej przez prasę oraz pracy wykonanej przez napęd przemieszczający rolki dociskowe. Wykonanie obliczeń związanych z wyznaczeniem parametrów siłowych i energetycznych procesu wymaga uwzględnienia dwóch faz określających warunki kontaktu rolki z segmentem kształtującym: fazy ruchu odpowiadającej atakowi rolki na krawędź segmentu, dla przemieszczenia rolki do położenia rozpoczynającego toczenie po powierzchni płaskiej segmentu oraz fazy ruchu po powierzchni płaskiej segmentu. Określenie przedziałów czasowych, a także przemieszczeń odpowiadających tym fazom ruchu rolki jest identyczne jak w procesie kształtowania z ustaloną wielkością wgłębienia.

Wielkość pracy jest proporcjonalna do wielkości wgłębienia spowodowanego działaniem siły nacisku prasy i siły przemieszczenia rolek. Wielkość wgłębienia pojedynczego segmentu, spowodowanego naciskiem prasy, ze względu na stałą prędkość wgłębienia spowodowanego naciskiem prasy, jest odwrotnie proporcjonalna do liczby segmentów w zestawie i wynosi:

$$w_p = \frac{w_{poj}}{i} = \frac{0,2}{6} = 0,033 \text{ mm.}$$

Wgłębienie spowodowane siłą oddziaływania rolek jest równe:

$$w_r = w_{poj} - 0,033 = 0,2 - 0,033 = 0,167 \text{ mm.}$$

Całkowita praca wgłębienia segmentu, dla kolejnych faz wgłębienia, jest taka sama jak w procesie z wymuszonym pojedynczym wgłębieniem (tab. 1). Natomiast praca wykonana przez siłę nacisku prasy, dla i -tego wgłębienia, jest równa:

$$L_{npi} = \frac{L_{nci}}{6}.$$

Praca wykonana przez napęd rolek, przez wgłębienie jednego segmentu w i -tym przejściu, jest równa pracy całkowitej wgłębienia pomniejszonej o pracę wykonaną przez nacisk prasy:

4. FORCE AND ENERGY PARAMETERS FOR RESISTANCE PLATE MOVEMENT SPEED FORCED BY PRESSING FORCE FROM PRESS

The variant of metal forming in which resistance plate movement is forced by pressing force from the press requires two active energy-generating sources to be accounted for. The work performed by the press and the work performed by the drive moving the press rolls. Calculations related to determination of force and energy parameters of the process account for two phases defining the conditions of contact between the roll and forming segment. The movement phases correspond to the roll's attack on the segment edge, roll movement to the position initiating rolling over the segment's flat surface and movement over the segment's flat surface. Determination of the time intervals and displacements corresponding to these roll movement phases is performed identically as in the forming process with fixed indent size.

The value of work is proportional to the indent size caused by the action of pressing force and roll movement force. The indent size of a single segment caused by the pressing force is inversely proportional to the number of segments in the set due to the constant indentation speed under pressing force, and it is equal to:

$$w_p = \frac{w_{poj}}{i} = \frac{0,2}{6} = 0,033 \text{ mm.}$$

Indentation caused by the force of rolls' action is equal to:

$$w_r = w_{poj} - 0,033 = 0,2 - 0,033 = 0,167 \text{ mm.}$$

Total segment indentation work for successive indentation phases is the same as in the process with forced single indentation (Tab. 1). The work performed by the press (pressing force) for the i -th indent is equal to:

$$L_{npi} = \frac{L_{nci}}{6}.$$

The work performed by the roll drive through indentation of a single segment in the i -th pass is equal to the total indentation work reduced by the work performed by the press:

$$L_{tri} = L_{nci} - L_{tpi} = \frac{5}{6} L_{nci}$$

Jak wykazały obliczenia, wykonane dla wariantu kształtowania z wymuszonym wgłębieniem, praca sił tarcia tocznego jest pomijalnie mała.

Całkowita praca wykonana przez napęd rolki $L_r = 651,80$ J, a praca wykonana przez prasę $L_p = 52,15$ J.

Uzyskanie wgłębienia 0,2 mm, dla wariantu kształtowania wymuszonym naciskiem przemieszczającego się z prędkością v_p stempla prasy, wymaga przemieszczania rolki na drodze równej sumarycznej szerokości wszystkich segmentów powiększonej o wybiegi zapewniające rozpoczęcie każdego przejścia z pozycji, w której punkt wyznaczony przez krawędź kontaktu rolki z segmentem w stosunku do najniższego punktu rolki jest położony wyżej o:

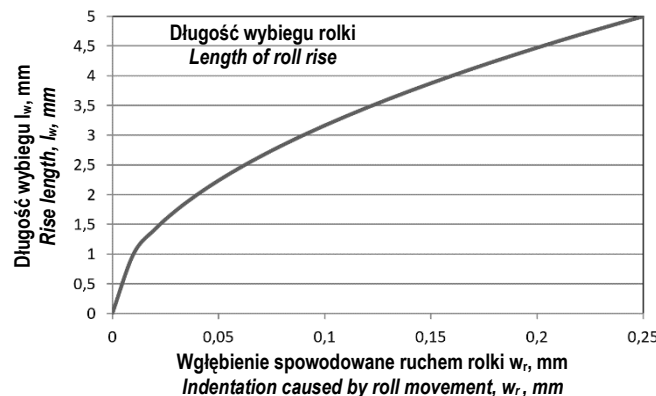
$$y = w_r = w_{poj} - v_p \cdot t_1 \quad (26)$$

gdzie: t_1 – czas przemieszczania rolki na drodze odpowiadającej szerokości rolki b , mm; v_p – prędkość ruchu stempla prasy, mm/s.

Wielkości wybiegów rolki zapewniających taką odległość jest wtedy równa:

$$l_w = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - w_r\right)^2} \quad (27)$$

gdzie: w_r – wielkość wgłębienia spowodowana przemieszczeniem rolki, mm.



Rys. 8. Długość wybiegu rolki w funkcji wielkości wgłębienia

Fig. 8. Length of roll rise as a function of indent size

Wielkość wgłębienia spowodowaną ruchem stempla prasy dla każdego segmentu obliczyć można z zależności:

$$w_p = v_p \cdot t_1 = v_p \cdot \frac{b}{v_r}, \quad (28)$$

$$L_{tri} = L_{nci} - L_{tpi} = \frac{5}{6} L_{nci}$$

As shown by calculations performed for the forming variant with forced indentation, the work of rolling resistance forces is negligibly small.

Total work performed by roll drive $L_r = 651.80$ J, and work performed by press $L_p = 52.15$ J

Achievement of a 0.2 mm indent for the forming variant with forced pressing force of the press punch, moving at speed v_p , requires roll movement over a path equal to the total width of all segments increased by rises ensuring that the start of every transition occurs from a position where the point defined by the edge of the roll's contact with the segment is situated higher than the lowest point on the roll by a value of:

$$y = w_r = w_{poj} - v_p \cdot t_1 \quad (26)$$

where: t_1 – time of roll movement over path corresponding to roll width b , mm; v_p – movement speed of punch press, mm/s.

The roll rise value ensuring such as distance is then equal to:

$$l_w = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - w_r\right)^2} \quad (27)$$

where: w_r – size of indentation caused by roll movement, mm.

The size of the indent caused by punch press movement for every segment can be calculated from dependency:

$$w_p = v_p \cdot t_1 = v_p \cdot \frac{b}{v_r}, \quad (28)$$

a wielkość wgłębienia spowodowaną przemieszczeniem rolki:

$$w_r = w_{poj} - v_p \cdot \frac{b}{v_r} \quad (29)$$

Częstotliwość przemieszczania rolek, dla zapewnienia wymaganych długości wybiegów l_w , dla prędkości przemieszczania rolek v_r , jest wyrażona wzorem:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v_p}{2 \cdot (l_s \cdot b + 2l_w)} \quad (30)$$

gdzie: l_s – liczba segmentów.

Prędkość przemieszczania płyty oporowej (suwaka prasy), dla uzyskania w pojedynczym przejściu wgłębienia $w_{poj} = 0,2$ mm jest obliczana ze wzoru:

$$v_p = \frac{w_p}{t_1} = \frac{\frac{w_{poj}}{l_s}}{\frac{b}{v_r}} = \frac{w_{poj} \cdot v_r}{b \cdot l_s} = \frac{0,2 \cdot 60}{5 \cdot 6} = 0,4 \frac{mm}{s} \quad (31)$$

5. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA PARAMETRÓW SIŁOWO-ENERGETYCZNYCH

Eksperyment został zrealizowany na stanowisku badawczym (rys. 1) znajdującym się na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej. Stanowisko to składa się z prasy hydraulicznej o nacisku $F = 1500$ kN oraz przyrządu wyposażonego: w system przemieszczanych napędem śrubowym rolek o średnicy $D = 100$ mm oraz w zestaw narzędzi składających się z matrycy, obsady prowadzącej segmenty kształtujące z dwoma oknami, w których umieszczone są segmenty kształtujące (rys. 1). Konstrukcja przyrządu pozwala na zainstalowanie matrycy o maksymalnych wymiarach $L_{max} \times B_{max} = 135$ mm \times 75 mm. W procesie kształtowania odkuwki modelowej (rys. 4) dokonano pomiaru siły i drogi przemieszczania płyty oporowej (rys. 9). W warunkach rzeczywistych siła składowa F_n zmienia się w trakcie przechodzenia na kolejne segmenty, osiągając wartość maksymalną na segmentie środkowym 4 (rys. 10). Siła składowa F_n , w przypadku odkształcania na prasie hydraulicznej, ma wartość zmienną w trakcie przemieszczania na drodze odpowiadającej szerokości jednego segmentu $s = 5$ mm (rys. 11). Prędkość przemieszczania płyty oporowej (stempla prasy) jest zależna od wielkości nacisku prasy. Prędkość ta jest stała dla określonego nacisku

and the size of indentation caused by roll movement:

$$w_r = w_{poj} - v_p \cdot \frac{b}{v_r} \quad (29)$$

The frequency of roll movement required to ensure the required rise lengths l_w , for roll movement speed v_r , is expressed by the formula:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v_p}{2 \cdot (l_s \cdot b + 2l_w)} \quad (30)$$

where: l_s – number of segments.

The movement speed of the resistance plate (press slide), for single-pass indent size $w_{ind} = 0.2$ mm, is calculated from the formula:

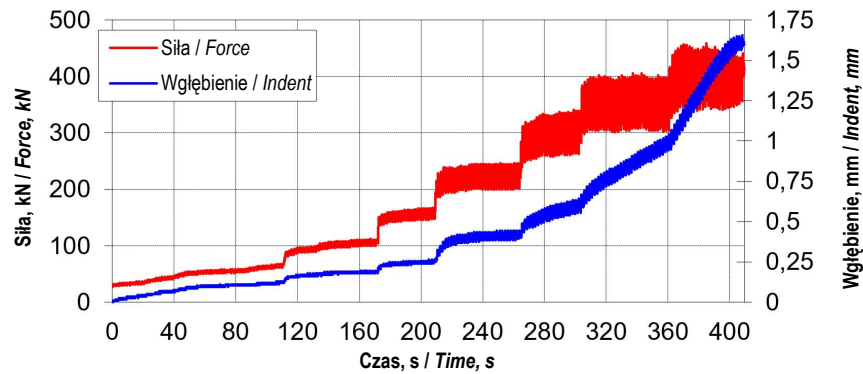
$$v_p = \frac{w_p}{t_1} = \frac{\frac{w_{poj}}{l_s}}{\frac{b}{v_r}} = \frac{w_{poj} \cdot v_r}{b \cdot l_s} = \frac{0,2 \cdot 60}{5 \cdot 6} = 0,4 \frac{mm}{s} \quad (31)$$

5. EXPERIMENTAL VERIFICATION OF FORCE AND ENERGY PARAMETERS

The experiment was conducted on the test station (Fig. 1) found at the Faculty of Materials Engineering and Metallurgy of the Silesian University of Technology. This station consists of a hydraulic press with pressing force $F = 1500$ kN and an attachment equipped with: a system of rolls $D = 100$ mm in diameter moved by a screw drive as well as a set of tools consisting of a die, guide mounting for forming segments, with two windows in which forming segments are placed (Fig. 1). The attachment's design makes it possible to install a die with maximum dimensions $L_{max} \times B_{max} = 135$ mm \times 75 mm. In the process of forming the model forging (Fig. 4), the force and movement path of the resistance plate were measured (Fig. 9). Under real conditions, force component F_n changes during transitions to successive segments, reaching its maximum value on central segment 4 (Fig. 10). In the case of forming on a hydraulic press, force component F_n has a variable value over the course of movement over a path corresponding to the width of a single segment $s = 5$ mm (Fig. 11). The movement speed of the resistance plate (press punch) depends on the pressing force exerted by the press. This speed is constant for a specific pressing force and grows as this force increases. An example

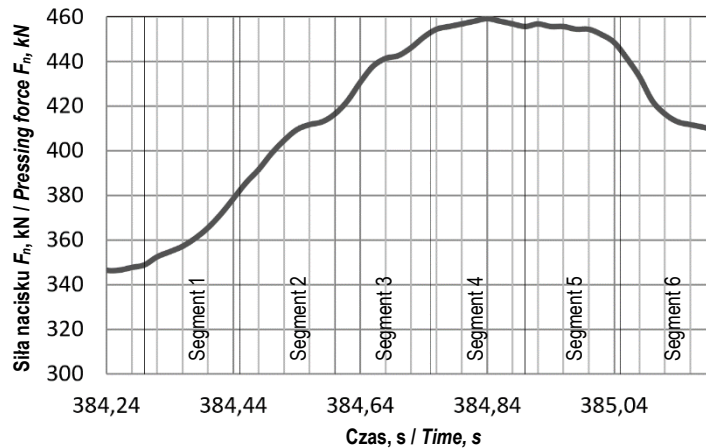
i rośnie wraz z naciskiem prasy. Przykładowy wykres z rejestracji przemieszczenia dla nacisku prasy równego 400 kN pokazany jest na rys. 12.

of a chart on which displacements are registered for pressing force equal to 400 kN is shown in Fig. 12.



Rys. 9. Zarejestrowany przebieg siły i wgłębienia w funkcji czasu

Fig. 9. Registered progression of force and indentation as a function of time



Rys. 10. Zarejestrowany przebieg siły nacisku w funkcji czasu odpowiadający przesunięciu rolki na długości odpowiadającej 6 segmentom

Fig. 10. Registered progression of pressing force as a function of time corresponding to roll movement over a length corresponding to 6 segments

Całkowita praca wykonana przez segmenty 1 do 6 jest równa sumie prac wykonanych przez pojedyncze segmenty. Czas przemieszczenia rolki na drodze 33 mm jest równy $384,24 - 385,2 = 0,96$ odpowiada to prędkości przemieszczania $v = 33/0,96 = 34,4$ mm/s.

Eksperymentalnie wyznaczona funkcja wielkości wgłębienia segmentów w funkcji czasu, dla przedziału czasowego $384,24 - 385,2 = 0,96$ s, ma postać (rys. 10):

$$w = 0,0195 \cdot t - 5,5817 \quad (32)$$

Współczynnik 0,0195 reprezentuje prędkość wgłębienia $v = 0,0195$ mm/s. Dla takiej prędkości

The total work performed by segments 1 to 6 is equal to the sum of works performed by individual segments. The time of roll movement over a path of 33 mm is equal to $384,24 - 385,2 = 0,96$, and this corresponds to a movement speed of $v = 33/0,96 = 34,4$ mm/s.

The experimentally determined function of segment indentation sizes over time, for the time interval $384,24 - 385,2 = 0,96$ s, has the following form (Fig. 10):

$$w = 0,0195 \cdot t - 5,5817 \quad (32)$$

The coefficient of 0,0195 represents indentation speed $v = 0,0195$ mm/s. For this indentation

wgłębienia wielkość wgłębienia segmentu, w czasie jednego przejścia rolki, można obliczyć z zależności:

$$w_{poj} = 0,0195 \cdot \frac{T}{2} = 0,0195 \cdot \frac{1}{2 \cdot f} \quad (33)$$

Dla uzyskanej w eksperymencie częstotliwości $f = 0,55$ Hz wielkość wgłębienia odpowiadająca jednemu przejściu rolki wynosi:

$$w_{poj} = \frac{0,0195}{2 \cdot f} = \frac{0,0195}{2 \cdot 0,55} = 0,0177 \text{ mm} \quad (34)$$

Przykładowy przebieg siły nacisku F_n dla przemieszczenia rolki naciskającej na trzeci segment pokazany jest na rys. 9.

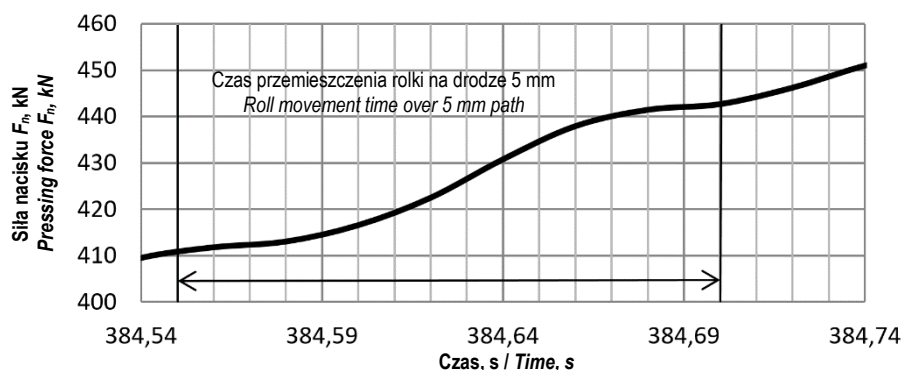
speed, the segment indentation size over the course of one roll pass can be calculated from dependency:

$$w_{poj} = 0,0195 \cdot \frac{T}{2} = 0,0195 \cdot \frac{1}{2 \cdot f} \quad (33)$$

For the frequency $f = 0,55$ Hz obtained in the experiment, the indent size corresponding to a single roll pass is equal to:

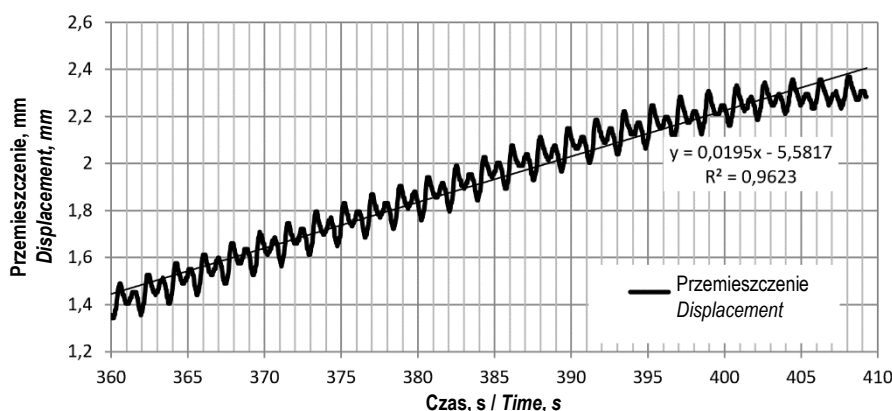
$$w_{poj} = \frac{0,0195}{2 \cdot f} = \frac{0,0195}{2 \cdot 0,55} = 0,0177 \text{ mm} \quad (34)$$

An example of pressing force F_n progression for movement of the press roll onto the third segment is shown in Fig 9.



Rys. 11. Zarejestrowany przebieg siły nacisku w funkcji czasu odpowiadający przemieszczeniu rolki na szerokości segmentu b (segment 3) pomiędzy 384,54 a 384,69 sekundą

Fig. 11. Registered progression of pressing force as a function of time, corresponding to roll movement over the width of the segment b (segment 3) between the times 384.54 s and 384.69 s



Rys. 12. Zarejestrowane dla nacisku prasy 400 kN przemieszczenie płyty oporowej w funkcji czasu dla przedziału czasu pomiędzy 360 a 410 sekundą

Fig. 12. Resistance plate displacement as a function of time registered for pressing force of 400 kN, for time interval between the 360th and 410th second

Drogę o długości 5 mm (równej szerokości jednego segmentu) pokonuje rolka w czasie $t_1 = (384,696 - 384,576) = 0,12$ s.

The roll travels over a path 5 mm long over a time of $t_1 = (384.696 - 384.576) = 0.12$ s.

Pracę wykonaną przez siłę składową F_n reprezentuje pole zawarte pod wykresem $F_n = F_n(w)$ dla przedziału $w_{poj} = 0,0177$ mm.

$$L_n = \int_0^{w_{poj}} F_n(w) \cdot dw \quad (35)$$

$$L_n = 0,0177 \cdot (411,79 + 441,46) \cdot 10^{-3} / 2 = 7,55 \cdot 10^{-3} \text{ kJ} = 7,55 \text{ J}$$

Wykres przebiegu siły składowej F_n w funkcji drogi $F_n = F_n(s)$ dla przemieszczenia odpowiadającego szerokości jednego segmentu składa się dwóch części. Pierwsza część związana jest z naciskiem na krawędź segmentu, do momentu pełnego zetknięcia z powierzchnią płaską, a druga część odpowiada przemieszczaniu się po powierzchni płaskiej segmentu, do momentu zetknięcia z krawędzią kolejnego segmentu.

Maksymalny kąt natarcia $\alpha_{max} = 0,028$ rd. Droga natarcia rolki na krawędź $s' = 1,4$ mm. Droga odpowiadająca przemieszczaniu rolki po powierzchni płaskiej segmentu

$$s'' = 5 - 1,4 = 3,6 \text{ mm.}$$

Dla pierwszej części, odpowiadającej fazie natarcia rolki na krawędź segmentu, praca jest obliczana ze wzoru:

$$L'_t = \int_0^{s'} [F'_t(s) + F'_{tf}(s)] ds = 0,836 \text{ J} \quad (36)$$

Dla drugiej części, odpowiadającej przemieszczaniu rolki po powierzchni płaskiej segmentu, praca obliczana jest ze wzoru:

$$L''_t = \int_{s'}^b F_t(s) ds = 6,143 \text{ J} \quad (37)$$

Całkowita praca wykonana przez składową siłę F_t jest sumą pracy wykonanej na drodze s' i s'' : $L_{tc} = L'_t + L''_t = 0,836 + 6,143 = 6,969 \text{ J}$.

Ze względu na ograniczoną sztywnością prasy i przyrzędu wielkość siły nacisku nie możliwe było uzyskanie założonej wielkości pojedynczego wgłębienia $w_{poj} = 0,2$ mm. Z tego względu uzyskane wyniki eksperymentalne można zastosować jedynie do jakościowego opisu parametrów siłowo-energetycznych procesu plastycznego kształtowania segmentowego.

Wykonane pomiary parametrów siłowych, geometrycznych i kinetycznych pozwoliły na potwierdzenie poprawności założeń przyjętych do analizy teoretycznej procesu segmentowego kształtowania plastycznego. W szczególności dotyczy to założenia dotyczącego udziału nacisku prasy w realizacji wgłębienia segmentów w powiązaniu z naciskiem rolki roboczej spowodowanym siłą przemieszczania poprzecznego. Poz-

The work performed by force component F_n is represented by the area contained under $F_n = F_n(w)$ within the interval $w_{ind} = 0.0177$ mm.

$$L_n = \int_0^{w_{poj}} F_n(w) \cdot dw \quad (35)$$

$$L_n = 0,0177 \cdot (411,79 + 441,46) \cdot 10^{-3} / 2 = 7,55 \cdot 10^{-3} \text{ kJ} = 7,55 \text{ J}$$

The chart of the progression of force component F_n as a function of path $F_n = F_n(s)$ for movement corresponding to the width of one segment consists of two parts. The first part is related to pressure on the segment edge, until the instant of complete contact with the flat surface, and the second part corresponds to movement over the segment's flat surface, until the instant of contact with the edge of the next segment.

Maximum angle of incidence $\alpha_{max} = 0,028$ rd. Path of roll attack on edge $s' = 1,4$ mm. Path corresponding to roll movement over the segment's flat surface

$$s'' = 5 - 1,4 = 3,6 \text{ mm.}$$

For the first part, corresponding to the phase of roll attack on the segment edge, work is calculated from formula:

$$L'_t = \int_0^{s'} [F'_t(s) + F'_{tf}(s)] ds = 0,836 \text{ J} \quad (36)$$

For the second part, corresponding to roll movement over the segment's flat surface, work is calculated from formula:

$$L''_t = \int_{s'}^b F_t(s) ds = 6,143 \text{ J} \quad (37)$$

The total work performed by force component F_t is the sum of work performed over path s' and s'' : $L_{tc} = L'_t + L''_t = 0,836 + 6,143 = 6,969 \text{ J}$.

Due to the fact that the pressing force of the press and attachment are limited by their rigidity, it was not possible to obtain the assumed single indent size of $w_{ind} = 0.2$ mm. For this reason, obtained experimental results may be applied only to a qualitative description of force and energy parameter of the segment forming process.

Measurements of force, geometrical and kinetic parameters made it possible to confirm the correctness of assumptions adopted for theoretical analysis of the segment forming process. In particular, this pertains to the assumption concerning the share of pressing force in the performance of segment indentation in relation to the pressing force of the working roller effected by the force of transverse movement. These measure-

zwoliły również na określenie charakteru wpływu siły nacisku prasy na prędkość wgłębiania segmentów i wielkość pojedynczego wgłębiania. Dokładne określenie pracy wykonanej przez prasę i napęd przyrzędu do przemieszczania rolki dociskowej wymaga przeprowadzenia pomiarów zużycia energii przez ich napędy.

6. WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań pozwalają na sformułowanie wymienionych niżej wniosków.

1. Proces segmentowego kształtowania plastycznego może być realizowany dwoma sposobami: przez zadaną ustawieniem płyty oporowej wielkość wgłębiania w pojedynczym przejściu rolek dociskowych lub wymuszenie naciskiem prasy stałej prędkości przemieszczania płyty oporowej. Obydwa warianty kształtowania pozwalają na uzyskanie identycznych wyrobów finalnych. Wariant kształtowania z wymuszonym naciskiem prasy powinien zapewnić większą wydajność produkcji.
2. Parametry siłowo-energetyczne dla obydwu wariantów segmentowego kształtowania plastycznego są do siebie zbliżone. Występujące różnice są spowodowane sposobem przeniesienia sił niezbędnych do realizacji procesu wytwarzania elementów integralnych.
3. W procesie kształtowania z założoną wielkością pojedynczego wgłębiania praca wykonywana jest w całości przez układ napędowy do przemieszczania rolek naciskowych.
4. W procesie kształtowania z wymuszoną prędkością wgłębiania segmentów odkształcających energia niezbędna do kształtowania plastycznego jest sumą pracy wykonanej przez prasę hydrauliczną oraz układ napędowy przyrzędu do kształtowania segmentowego.
5. Wyniki obliczeń parametrów siłowych, energetycznych oraz cech geometrycznych określających warunki oddziaływania sił pomiędzy rolkami naciskowymi i powierzchnią segmentów kształtujących oraz powierzchnią płyty oporowej wykazały potrzebę przeprowadzenia dalszych badań. Konieczne jest przeprowadzenie optymalizacji procesu kształto-

ments also made it possible to determine the nature of the influence of pressing force on segment indentation speed and the size of a single indent. Precise determination of the work performed by the press and the drive of the attachment serving to move the press roll requires measurements of energy consumed by these drives.

6. CONCLUSIONS

Obtained research results allow for formulation of the following conclusions:

1. *The segment forming process can be performed according to two methods: with indent size in a single press roll pass set by the resistance plate's position or with constant resistance plate movement speed forced by pressing force from the press. Both forming variants make it possible to obtain identical final products. The forming variant with applied pressing force should provide greater production output.*
2. *Force and energy parameters are similar for both segment forming variants. The differences that are present are due to the method by which the forces required to perform the process of integral element production are carried.*
3. *In the forming process with a defined single indent size, work is entirely performed by the drive system for moving press rolls.*
4. *In the forming process with forced indentation speed of deforming segments, the energy required for forming is the sum of work performed by the hydraulic press and by the drive system of the segment forming attachment.*
5. *The results of calculations of force and energy parameters and of geometrical features defining the conditions of interaction between press rolls and the surface of forming segments as well as the surface of the resistance plate demonstrated a need for further study. It is necessary to optimize the forming process, which involves selecting a*

wania polegającym na doborze wielkości średnicy rolek naciskowych oraz grubości segmentów kształtujących, zapewniających najmniejsze naciski kształtowania i pracę kształtowania oraz najmniejsze zużycie narzędzi i najlepszą jakość wyrobów (dokładność i gładkość powierzchni).

6. Opanowanie procesu segmentowego kształtowania plastycznego na skalę przemysłową wymaga ustalenia wariantowych cech konstrukcyjnych prasy oraz przyrządu umożliwiających ciągłość i elastyczność produkcji określonego asortymentu elementów integralnych.
7. Badania eksperymentalne wykazały, że przyjęty do obliczenia sił i pracy model kształtowania nie uwzględnia zróżnicowanych warunków płynięcia materiału dla segmentów zlokalizowanych w środkowej strefie wgłębiania. Wielkość siły wgłębiania dla tych segmentów jest ok. 30 % większa od siły wgłębiania dla segmentów skrajnych (w pobliżu żeber prostopadłych do kierunku przemieszczania rolek dociskowych).

press roll diameter and thickness of forming segments that ensure the lowest forming pressures and forming work as well as the lowest tool wear and best product quality (accuracy and smoothness of the surface).

6. *Mastery of the segment forming process on an industrial scale requires determination of variants of press design features as well as an attachment that ensure continuity and flexibility of production of a specific assortment of integral elements.*
7. *Experimental tests have demonstrated that the forming model adopted for calculation of forces and work does not account for diverse material flow conditions for segments situated in the central indentation zone. The value of the indentation force is approx. 30% higher for these segments than the indentation force for extreme segments (near ribs perpendicular to the direction of press roll movement).*

PODZIĘKOWANIA

Badania zrealizowano w ramach prac własnych.

ACKNOWLEDGEMENTS

Research was realized as a part of the Silesian University of Technology Work Program.

LITERATURA

- [1] Wiślicki T. 1964. *Technologia budowy płatowców*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo – Techniczne
- [2] Groche P., D. Fritsche, E.A. Tekkaya, J.M. Allwood, G. Hirt, R. Neugebauer. 2007. „Incremental Bulk Metal Forming”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 56: 635–656.
- [3] Grosman F. 2015. „Rozwój procesów narastającego kształtowania plastycznego metali”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVI* (1): 47–72.
- [4] Korbela A., P. Martin. 1986. „Microscopic versus macroscopic aspect of shear bands deformation”. *Acta Metall.* 34: 1905–1909.
- [5] Pęcherski R.B. 1996. „Finite deformation plasticity with strain induced anisotropy and shear banding”. *Journal of Materials Processing Technology* 60: 35–44.
- [6] Korbela A., W. Bochniak. 2013. „Lüders deformation and superplastic flow of metals extruded by KOBO method”. *a Philosophical Magazine* 93 (15): 1883–1913.

REFERENCES

- [1] Wiślicki T. 1964. *Airframe design technology*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo – Techniczne
- [2] Groche P., D. Fritsche, E.A. Tekkaya, J.M. Allwood, G. Hirt, R. Neugebauer. 2007. “Incremental Bulk Metal Forming”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 56: 635–656.
- [3] Grosman F. 2015. “The development of incremental metal forming processes”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVI* (1): 47–72.
- [4] Korbela A., P. Martin. 1986. “Microscopic versus macroscopic aspect of shear bands deformation”. *Acta Metall.* 34: 1905–1909.
- [5] Pęcherski R.B. 1996. “Finite deformation plasticity with strain induced anisotropy and shear banding”. *Journal of Materials Processing Technology* 60: 35–44.
- [6] Korbela A., W. Bochniak. 2013. “Lüders deformation and superplastic flow of metals extruded by KOBO method”. *a Philosophical Magazine* 93 (15): 1883–1913.

- [7] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, L. Błaż. 2011. "Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme". *Metallurgical and Materials Transactions A* 42a, (September): 2881–2897.
- [8] Grosman F., Ł. Madej, S. Ziółkiewicz, J. Nowak. 2012. "Experimental and numerical investigation on development of new incremental forming process". *Journal of Materials Processing Technology* 212: 2200–2209.
- [9] Grosman F., M. Tkocz, J. Pawlicki, B. Lipska. 2012. „Wytwarzanie elementów integralnych w procesie kształtowania segmentowego”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 583–586.
- [10] Szyndler J., Ł. Madej, F. Grosman. 2012. „Analiza numeryczna płynięcia materiału w obszarze pojedynczych kowadełek w procesie kucia segmentowego”. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 583–586.
- [11] Szyndler J., L. Madej. 2015. "Metalforming methods dedicated for aerospace industry", *Computer Methods in Materials Science* 15 (2): 294–310.
- [12] Grosman F., Ł. Madej, S. Ziółkiewicz, J. Nowak. 2012. "Experimental and numerical investigation on development of new incremental forming process". *Journal of Materials Processing Technology* 212: 2200–2209.
- [13] Nowak J., Ł. Madej, F. Grosman, M. Pietrzyk. 2010. "The material flow analysis in the modified orbital forging technology". *Materials Science Forum* 654–656: 1622–1625.
- [14] Szyndler J., F. Grosman, M. Tkocz, Ł. Madej. 2016. "Numerical and experimental investigation of the innovatory incremental forming process dedicated for the aerospace industry". *Metallurgical and Materials Transactions* 47A (November): 5522–5533.
- [7] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, L. Błaż. 2011. "Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme". *Metallurgical and Materials Transactions A* 42a, (September): 2881–2897.
- [8] Grosman F., Ł. Madej, S. Ziółkiewicz, J. Nowak. 2012. "Experimental and numerical investigation on development of new incremental forming process". *Journal of Materials Processing Technology* 212: 2200–2209.
- [9] Grosman F., M. Tkocz, J. Pawlicki, B. Lipska. 2012. "Incremental forming of integral parts". *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 583–586.
- [10] Szyndler J., Ł. Madej, F. Grosman. 2012. "Numerical analysis of material flow in the area of subsequent anvils during incremental forging process". *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 8: 583–586.
- [11] Szyndler J., L. Madej. 2015. "Metalforming methods dedicated for aerospace industry", *Computer Methods in Materials Science* 15 (2): 294–310.
- [12] Grosman F., Ł. Madej, S. Ziółkiewicz, J. Nowak. 2012. "Experimental and numerical investigation on development of new incremental forming process". *Journal of Materials Processing Technology* 212: 2200–2209.
- [13] Nowak J., Ł. Madej, F. Grosman, M. Pietrzyk. 2010. "The material flow analysis in the modified orbital forging technology". *Materials Science Forum* 654–656: 1622–1625.
- [14] Szyndler J., F. Grosman, M. Tkocz, Ł. Madej. 2016. "Numerical and experimental investigation of the innovatory incremental forming process dedicated for the aerospace industry". *Metallurgical and Materials Transactions* 47A (November): 5522–5533.