

NUMERYCZNE MODELOWANIE ZUŻYCIA WYKROJÓW PODCZAS WALCOWANIA PRĘTÓW

Dominika STRYCHARSKA, Piotr SZOTA, Sebastian MRÓZ, Łukasz GAJ

Streszczenie: W pracy określono zużycie wykrojów wydłużających podczas walcowania prętów w warunkach walcowni ciągłej. Do numerycznego modelowania procesu walcowania zastosowano dwa typy układów wykrojów: owal poziomy – koło – owal poziomy oraz owal poziomy – owal pionowy – owal poziomy. Do określenia zużycia wykrojów wykorzystano wyniki obliczeń numerycznych jednostkowej pracy sił tarcia otrzymane za pomocą programu komputerowego Forge2008® oraz obliczeń empirycznych. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń określono koszty zużycia walców.

Słowa kluczowe: zużycie, walcowanie w wykrojach, kalibrowanie walców, numeryczne modelowanie, MES, koszty zużycia walców

1. Wprowadzenie

Walcowanie ciągle wyrobów długich można zaliczyć do najbardziej wydajnych procesów pozwalających otrzymać wyrób gotowy o wysokich własnościach mechanicznych i wytrzymałościowych oraz dobrej jakości powierzchni w wąskim zakresie pola tolerancji wymiarowych [1]. Dokładność wymiarowa wyrobu gotowego uzależniona jest od zastosowanych kształtów zestawu wykrojów współpracujących kolejno ze sobą. Wykroje te podczas eksploatacji ulegają zużyciu, co wpływa na dokładność wymiarową wyrobu gotowego i na przebieg procesu walcowania [1-3].

Zużywanie się wykrojów, możemy określić jako ilość materiału, który może zostać przewalcowany za pomocą kompletu walców (2 walce), otrzymując wyroby o odpowiedniej jakości. Na zużycie wykrojów mają wpływ między innymi warunki tarcia, charakter rozkładu i wartości sił nacisków jednostkowych, różnicy względnych prędkości między narzędziem i odkształcanym materiałem, temperatura walcowania, obecność ciał trzecich (tlenki, smary) na powierzchniach styku metalu z narzędziami [2].

Narzędzia do przeróbki plastycznej powinny zapewniać wysoką jakość wyrobów gotowych przy odpowiednio dużej wielkości produkcji oraz niskich kosztach ich wytworzenia. Wyroby walcowane, aby uznane były za dobrej jakości, muszą spełniać wymagania zawarte w odpowiednich normach, dotyczą one wymiarów, jakości powierzchni oraz własności technologicznych. Czynniki te mają decydujący wpływ na określenie momentu, w którym zużycie wykrojów nie pozwala na walcowanie odpowiednich pod względem dokładności i jakości powierzchni wyrobów [1,4,5].

Najczęściej występującym typem zużycia w procesach przeróbki plastycznej jest zużycie ścierne, wywołane tarcie między powierzchnią roboczą walca a walcowanym materiałem. Zużycie to zależy od gładkości powierzchni, kształtu, gniotu jako czynnika decydującego o wartości nacisków, wielkości wyprzedzenia, opóźnienia, temperatury i prędkości. Do opisu tego rodzaju zużycia często stosowany jest model Archarda [6].

2. Opracowanie oprogramowania komputerowego do kalibrowania walców

W pracy analizowano wpływ układu wykrojów na ich zużycie ściernie. Zamianę wykroju okrągłego na owal pionowy wykonano w taki sposób, aby ich pola powierzchni były zbliżone, a współczynnik wydłużenia był taki sam, podczas walcowania w układzie wykrojów owal poziomy – koło – owal poziomy oraz w układzie owal poziomy – owal pionowy – owal poziomy.

Zmianę pośredniego wykroju okrągłego na owal pionowy przeprowadzono stosując iteracyjną metodę poszukiwania wymiarów (szerokości i wysokości owali pionowych) wykorzystując zależności statystyczne zamieszczone w pracy [1]. Zastosowany w pracy nowy układ wykrojów (z pośrednim wykrojem owalnym pionowym) powinien zapewnić, oprócz otrzymania wyrobu gotowego spełniającego przedmiotowe normy, również wyższą trwałość narzędzi w porównaniu do układu przed jego modyfikacją (owal poziomy – koło – owal poziomy).

W celu opracowania nowego kalibrowania walców dla walcowania prętów opracowano dwa programy komputerowe w języku Fortran i Basic. W programach tych wykorzystano iteracyjną metodę poszukiwania wymiarów wykrojów owalnych poziomych (program ow_poz.for) i pionowych (ow_pion.bas) stosując zależności statystyczne przedstawione przez V.K. Smirnova w pracy [11].

Do zmiany dotychczas istniejących pośrednich wykrojów okrągłych na owale pionowe zastosowano iteracyjną metodę poszukiwania wymiarów (szerokości i wysokości owali pionowych) wykorzystując następujące zależności statystyczne [11]:

a) przepust owal poziomy-owal pionowy:

$$H = H_0 + \lambda - \left(\frac{1,666(a+0,164)}{\eta_1^2 a^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{\eta_1} = 1 + [0,51(a-1) - 0,13] \left(0,65 + \frac{1,1}{\sqrt{A_1}} \right) \quad (2)$$

b) przepust owal pionowy-owal poziomy:

$$H = H_0 + \lambda - \left(\frac{1,34}{\eta_2^2 (a + 0,164)} \right) \quad (3)$$

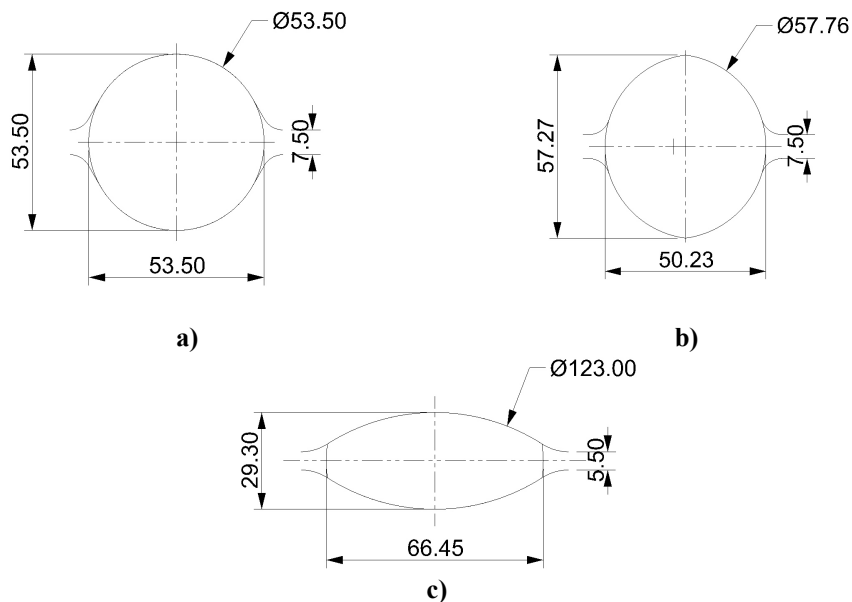
$$\frac{1}{\eta_2} = 1 + (a - 1,25) \left(0,397 + \frac{1,389}{A_1 + 2} \right) \quad (4)$$

gdzie: H – poszukiwana wysokość owalu pionowego na $i+1$ kroku przybliżenia,
 H_0 – wysokość owalu pionowego na i -tym kroku,
 λ – współczynnik wydłużenia,
 a – stosunek szerokości pasma w wykroju owalnym poziomym do jego wysokości,
 D_0 – średnica nominalna walca,

D_k – średnica walca na kołnierzu,
 s – odstęp między walcami.

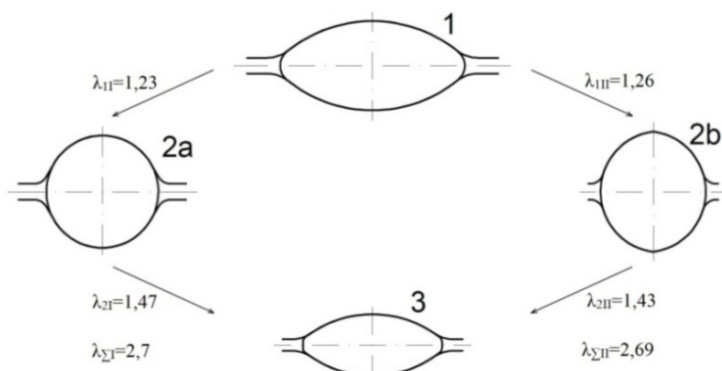
3. Analiza schematu walcowania

Walcowanie prętów okrągłych w układzie wykrojów owal poziomy – koło – owal poziomy posiada wiele zalet. W układach tych na walcowanym paśmie praktycznie nie występują ostre naroża, a odkształcenie na przekroju pasma jest zbliżone do równomiernego. Jednakże, stabilność procesu walcowania dla takiego układu wykrojów jest zapewniona tylko przy prawidłowym wypełnieniu poprzedzającego wykroju owalnego jak również i samego wykroju okrągłego, co w rzeczywistych warunkach trudno osiągnąć. Dlatego, w pracy zastosowano również drugi układ wykrojów: owal poziomy – owal pionowy – owal poziomy. Kształt i wymiary wykroju okrągłego oraz owalnego pionowego, a także owalu poziomego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1 Kształt i wymiary wykrojów wydłużających: a) okrągłego, b) owalnego pionowego, c) owalnego poziomego.

Zastosowanie nowego układu zapewnia większą równomierność temperatury pasma oraz większą dokładność wypełnienia wykrojów metalem [13]. Dzięki istotnej różnicy między szerokością i wysokością owalu pionowego pasmo przyjmuje stabilne położenie podczas jego walcowania w kolejnym przepuszczeniu w wykroju owalnym poziomym. Ze względu na jakość powierzchni metalu, układ wykrojów owal poziomy - owal pionowy - owal poziomy zapewnia również bardziej równomierne odkształcenie pasma na szerokości. Przedstawiony schemat walcowania (rys. 2) jest bardziej przydatny ze względu na uniwersalność oraz stabilność procesu walcowania i w efekcie końcowym zapewnia większą dokładność wymiarową prętów gotowych.



Rys. 2 Schemat walcowania: 1 – wykrój owalny poziomy, 2a – wykrój okrągły, 2b – wykrój owalny pionowy, 3 – wykrój owalny poziomy [14].

4. Matematyczny model wykorzystany w programie komputerowym Forge2008®

Proces walcowania w wykrojach charakteryzuje się trójosiowym schematem naprężeń i odkształceń. Trudno go zatem opisać za pomocą prostych zależności empirycznych. Do przeprowadzenia analizy plastycznego płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia należy rozwiązać układ równań teorii plastyczności, obejmujący związki geometryczne, równania fizyczne oraz równania równowagi, w których należy uwzględnić warunki procesu walcowania [1, 2].

Do rozwiązania zagadnienia trójwymiarowego plastycznego płynięcia metalu podczas walcowania prętów w wykrojach wykorzystany został matematyczny model, w którym stan mechaniczny odkształcanego materiału opisano za pomocą prawa Nortona-Hoffa [7-9], które można wyrazić za pomocą równania:

$$S_{ij} = 2K(T, \dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon})(\sqrt{3}\dot{\bar{\epsilon}})^{m-1}\dot{\epsilon}_{ij} \quad (5)$$

gdzie: S_{ij} – dewiator tensora naprężeń,
 $\dot{\bar{\epsilon}}$ – intensywność prędkości odkształcenia,
 $\dot{\epsilon}_{ij}$ – tensor prędkości odkształcenia,
 $\bar{\epsilon}$ – intensywność odkształcenia,
 T – temperatura,
 K – konsystencja zależna od naprężenia uplastyczniającego σ_p ,
 m – współczynnik charakteryzujący odkształcenie metalu na gorąco
 $(0 < m < 1)$.

Zużycie ściernie często opisywane jest za pomocą modelu Archarda [6], w którym założono, że w warunkach zużycia ściernego materiału V_z oddzielonego od jednostkowej powierzchni narzędzia jest wprost proporcjonalna do naprężenia normalnego σ_n działającego na powierzchnię narzędzia i drogi tarcia L_t , a odwrotnie proporcjonalna do twardości materiału H ulegającego zużyciu (w tym przypadku twardości narzędzia). Model ten można zapisać w postaci:

$$V_z = k_{zuz} \frac{\sigma_n L_t}{H} \quad (6)$$

gdzie: k_{zuz} - współczynnik zużycia.

Równanie (6) może być przedstawione w formie całkowej do rozwiązania za pomocą algorytmu opartego na MES:

$$V_z = k_{zuz} \int_0^t \frac{\sigma_n v_s}{H(T)} dt \quad (7)$$

gdzie: v_s – styczna prędkość poślizgu metalu po powierzchni narzędzia,
 t – czas,
 $H(T)$ – twardość narzędzia w określonej temperaturze.

Parametry σ_n , v_s oraz T są traktowane jako zmienne w czasie podczas procesu przeróbki plastycznej, dla każdego punktu na powierzchni narzędzia.

Do rozwiązania równania (7) należy znać wartość współczynnika zużycia k_{zuz} i twardość narzędzia H . W celu określenia twardości narzędzia H konieczne jest określenie współczynnika uwzględniającego wpływ jego temperatury na twardość. Dlatego dokładna ilościowa analiza zużycia narzędzi jest możliwa tylko po otrzymaniu odpowiednich danych empirycznych i wyznaczeniu współczynników empirycznych w równaniu (7).

Pominięcie wpływu współczynnika zużycia k_{zuz} i wpływu temperatury na twardość narzędzia pozwala wykorzystać równanie (7) tylko do celów porównawczych. Dlatego w modelu stosowanym w programie komputerowym Forge2008® równanie (7) uproszczono do postaci:

$$W = \int_0^t \sigma_n v_s dt \quad (8)$$

Ponieważ naprężenie tarcia τ_j jest iloczynem naprężenia normalnego σ_n i współczynnika tarcia μ [6, 10], stąd całka:

$$\int_0^t \sigma_n v_s dt \quad (9)$$

ma sens fizyczny i jest równa pracy sił tarcia na jednostkę powierzchni styku metalu z narzędziem.

Model zużycia wprowadzony do programu komputerowego Forge2008® nie pozwala uwzględnić zmian temperatury w narzędziach i nie pozwala definiować własności wzajemnie stykających się powierzchni odkształcanego metalu i narzędzia [2, 10].

W celu możliwości ilościowego określenia zużycia narzędzi należy równanie (7) przekształcić do poniższej postaci:

$$V_z = \frac{k_{zuz}}{HV} \int_0^t \sigma_n v_s dt \quad (10)$$

gdzie: HV – twardość Vickersa.

Zakładając, że w procesie walcowania twardość walców żeliwnych nie zależy od ich temperatury (twardość narzędzia w zakresie temperatur 20-100°C może ulegać nieistotnym zmianom), to wyrażenie $H(T)$ w równaniu (7) można wyłączyć przed znak całki. Po przeniesieniu wyrażenia $H(T)$ przed znak całki, wyrażenie podcałkowe będzie określać jednostkową pracę sił tarcia. W prowadzonych badaniach przyjęto, że twardość walców żeliwnych wynosi 480 HV. Twardość taką przyjęto na podstawie charakterystyki technicznej walców dostarczonej przez producenta walców.

5. Materiał i metodyka badań

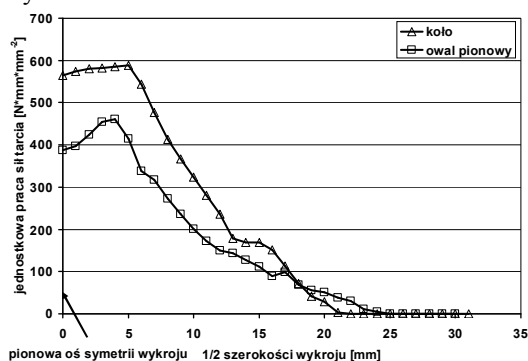
W ramach pracy przeprowadzono badania teoretyczne procesu walcowania wstępniaka o owalnym przekroju poprzecznym i wymiarach 88,2x42,5 mm w dwóch układach wykrojów: owal poziomy – koło – owal poziomy oraz owal poziomy – owal pionowy – owal poziomy (rys. 2).

Na podstawie otrzymanych wyników badań numerycznych wyznaczono jednostkową pracę sił tarcia niezbędną do określenia ilościowego zużycia walców. Numeryczne modelowanie procesu walcowania przeprowadzono dla jednej z krajowych 18-klatkowej walcowni ciągłej prętów D370. Do symulacji komputerowej przyjęto: średnicę walców 450 mm; współczynnik tarcia 0,3; współczynnik wymiany ciepła $3000 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^2$; temperaturę wstępniaka 1050°C gatunek walcowanej stali C45. Naprężenie uplastyczniające stali określono na podstawie wyników badań plastometrycznych przeprowadzonych w Instytucie Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa Politechniki Częstochowskiej za pomocą symulatora Gleeble3800 [15]. W celu skrócenia czasu obliczeń, obliczenia przeprowadzono dla $\frac{1}{4}$ przekroju poprzecznego walcowanego pasma.

6. Wyniki badań i ich analiza

Zmiana kształtu pośredniego wykroju okrągłego na owal pionowy zapewniła jego mniejsze zużycie, bardziej stabilne plastyczne płynięcie metalu oraz bardziej równomierny rozkład odkształcenia [13].

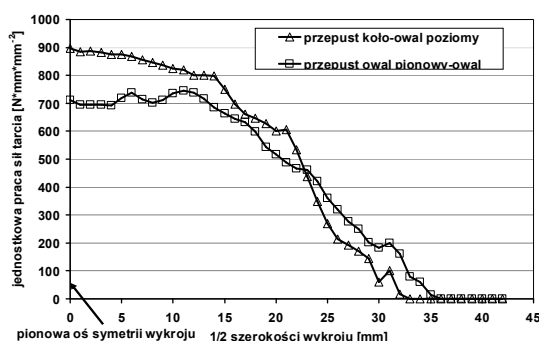
Na rysunku 3 porównano rozkład jednostkowej pracy sił tarcia na powierzchni walców, podczas walcowania wstępniaka owalnego w wykroju okrągłym i owalnym pionowym. Przedstawione na rys. 3 wartości są średnimi otrzymanymi dla trzech linii pomiarowych po wyjściu pasma z kotliny odkształcenia.



Rys. 3 Rozkład jednostkowej pracy sił tarcia na powierzchni walców podczas walcowania pasma owalnego w wykroju okrągłym i w wykroju owalnym pionowym, $\frac{1}{2}$ szerokości wykroju

Analizując wyniki badań teoretycznych przedstawione na rys. 3 można stwierdzić, że podczas walcowania pasma owalnego w wykroju okrągłym najwyższe wartości zużycia ściernego występują w środkowej części wykroju (ok. $590 \text{ N}\cdot\text{mm}\cdot\text{mm}^{-2}$) i maleją wraz z oddalaniem się od pionowej osi symetrii wykroju. Znacznie mniejsze wartości występują podczas walcowania pasma owalnego w wykroju owalnym pionowym (ok. $460 \text{ N}\cdot\text{mm}\cdot\text{mm}^{-2}$). Na przedstawionym rysunku największe zużycie ściernego wykroju odnotowano dla obszarów znajdujących się w pobliżu jego osi symetrii.

Na rysunku 4 porównano zmianę jednostkowej pracy sił tarcia na powierzchni wykrójów owalnych poziomych podczas walcowania pasma w dwóch układach: koło - owal poziomy i owal pionowy - owal poziomy. W wyniku zmiany kształtu wykroju okrągłego na owal pionowy nastąpiło zmniejszenie otrzymanych wartości jednostkowej pracy sił tarcia z ok. $900 \text{ N}\cdot\text{mm}\cdot\text{mm}^{-2}$ do ok. $750 \text{ N}\cdot\text{mm}\cdot\text{mm}^{-2}$.



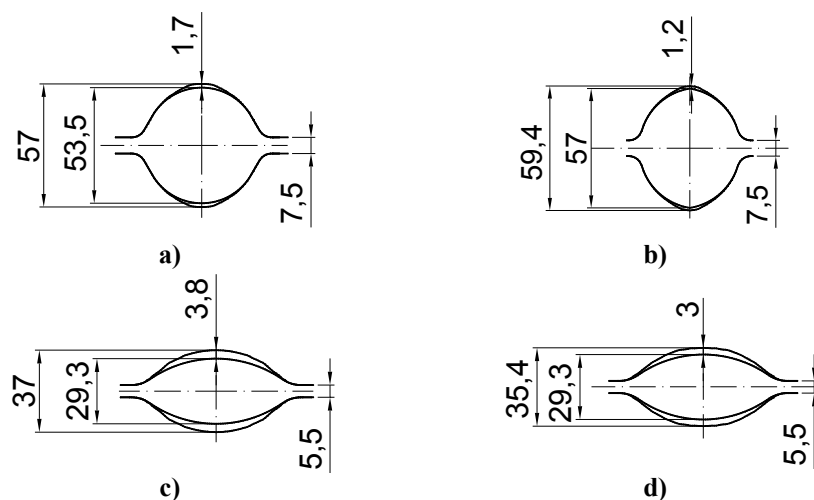
Rys. 4 Rozkład średniej jednostkowej pracy sił tarcia na powierzchni walców podczas walcowania pasma okrągłego w wykroju wykrój owalnym poziomym i pasma owalnego pionowego w wykroju owalnym poziomym, $\frac{1}{2}$ szerokości wykroju

Kolejnym etapem pracy było określenie ilościowego zużycia walców za pomocą równania (10). Podstawiając otrzymane wartości jednostkowej pracy sił tarcia, twardość walca oraz współczynnik zużycia walców określono teoretyczny kształt wykrójów po odwalcowaniu 5000 Mg prętów. Współczynnik zużycia walców przyjęto jako równy $6.74 \cdot 10^{-6}$. Został on wyznaczony w badaniach doświadczalnych procesu walcowania prętów w warunkach przemysłowych [12].

Na rysunku 5 pokazano kształt wykroju okrągłego i owalnego poziomego zastosowanego w układzie wykrójów owal – koło – owal po odwalcowaniu 5000 Mg prętów, w porównaniu do kształtu wykrójów nominalnych (na początku kampanii walcowniczej) oraz kształt wykroju owalnego pionowego i owalnego poziomego wykorzystywanych w układzie owal pionowy - owal poziomy po odwalcowaniu 5000 Mg prętów w porównaniu do kształtu wykrójów nominalnych.

Z danych pokazanych na rys. 5 wynika, że zużycie wykroju okrągłego po odwalcowaniu 5 000 Mg prętów wynosi 3,4 mm, natomiast zastosowanie wykroju modyfikowanego (owal pionowy) pozwala zmniejszyć zużycie do 2,4 mm. W wykroju owalnym poziomym stosowanym w układzie wykrójów owal poziomy - koło - owal poziomy zużycie po odwalcowaniu 5 000 Mg prętów wynosi 7,6 mm, a w tym samym wykroju stosowanym w układzie wykrójów owal poziomy - owal pionowy - owal poziomy zużycie wykroju zmniejsza się do 6,0 mm. Oznacza to, że zastosowanie wykroju o kształcie owalu pionowego, jako wykroju pośredniego, pozwala na zmniejszenie zużycie nie tylko w tym wykroju, ale rów-

niez w następnym (owal poziomy). Wprowadzenie tego rozwiązania w warunkach przemysłowych spowoduje zmniejszenie kosztów związanych z zużyciem walców.



Rys. 5. Kształt nominalnych wykrojów i wykrojów po odwalcowaniu 5000 Mg prętów: a) wykroj okrągły, b) wykroj owalny pionowy, c) przepust koło-owal poziomy, d) przepust owal pionowy-owal poziomy

Należy również nadmienić, że podczas walcowania w warunkach przemysłowych, następuje ciągła korekta wysokości wykroju, w wyniku zmniejszania odstępów między walcami. Fakt ten nie został uwzględniony podczas badań teoretycznych. Przedstawione wyniki obliczeń numerycznych nie uwzględniają zmiany odstępów między walcami, realizowanego w celu korekty wysokości wykroju.

7. Analiza kosztów zużycia walców

Podczas procesu walcowania prętów w wykroju okrągłym założono, że odwalcowano 5 000 Mg do momentu konieczności ich przetoczenia. Natomiast zastosowanie wykroju owalnego pionowego pozwoliło na przewalcowanie 7 100 Mg. Na szerokości beczki walca naciętych jest 7 wykrojów, w związku z czym zużycie tych wykrojów nastąpi po odwalcowaniu 35 000 Mg (wykroj okrągły) i 49 700 Mg wyrobu gotowego (wykroj owalny pionowy). Należy również uwzględnić fakt, iż walce mogą być przetaczane. Zakładając, że będą one przetoczone 6 razy umożliwi to przewalcowanie 210 000 Mg w wykroju okrągłym i 298 200 Mg w wykroju owalnym pionowym na jednym komplecie walców.

Do obliczeń przyjęto, że średnia całkowita produkcja prętów w analizowanej walcowni w okresie ostatnich 5 lat, w której wykorzystywany jest układ owal poziomy - koło - owal poziomy, wyniosła 325 000 Mg. Ilość sztuk walców (L_w), które ulegną zużyciu w ciągu jednego roku można wyliczyć z zależności:

$$L_w = (R_p/M_p) 2 \quad (11)$$

gdzie: R_p – roczna produkcja prętów w analizowanej walcowni,
 M_p – masa prętów odwalcowanych w 1 złożeniu walców.

Oznacza to, że do odwalcowania 325 000 Mg prętów, przy wykorzystaniu wykroju okrągłego, zużyty zostanie 1 komplet walców, a kolejny będzie zużyty w 55%. Natomiast przy zastosowaniu wykroju owalnego pionowego zużyty zostanie 1 komplet walców, a kolejny będzie zużyty w 10%. Do obliczenia kosztów zużycia walców w klatce 9 przyjęto, że masa jednego walca wynosi 1400 kg, ponadto cena za 1 kg walców żeliwnych wynosi 10 zł. Do kosztów tych należy również dodać koszty obróbki mechanicznej, który przyjęto jako 17% kosztów zakupu walców. Stąd też koszt zużycia walców można wyliczyć z zależności:

$$K_{zw} = L_w (M_w C_w + K_M) \quad (12)$$

gdzie: M_w – masa walca,
 C_w – cena 1 kg walca,
 K_M – koszty obróbki mechanicznej

Po wykonaniu obliczeń stwierdzono, że roczny koszt zużycia walców z wykorzystaniem wykroju okrągłego będzie wynosił 50 778 zł. Natomiast przy zastosowaniu wykroju owalnego pionowego koszt ten zmniejszy się do 32 760 zł.

Zastosowanie wykroju owalnego pionowego wpływa również na zmniejszenie zużycia wykroju w kolejnej klatce walcowniczej, tj. wykroju owalnego poziomego. Założono, że podczas walcowania prętów w wykroju owalnym poziomym w układzie wykrojów koło - owal poziomy odwalcowano 5 000 Mg. Natomiast w układzie wykrojów owal pionowy - owal poziomy w wykroju owalnym poziomym odwalcowano 6 315 Mg. Stąd też wszystkie wykroje znajdujące się na szerokości beczki walca zostaną zużyte po odwalcowaniu 35 000 Mg (przepust koło - owal poziomy) i 44 205 Mg prętów (przepust owal pionowy - owal poziomy). Dzięki możliwości przetoczenia walców, przewalcowane zostanie 210 000 Mg (przepust koło - owal poziomy) i 265 230 Mg wyrobu gotowego (przepust owal pionowy - owal poziomy).

Oznacza to, że wykorzystanie nowego układu wykrojów (owal poziomy - owal pionowy - owal poziomy) zapewni przewalcowanie 325 000 Mg prętów przy zużyciu jednego kompletu walców i kolejnego w 20%. Roczny koszt zużycia walców dzięki temu zmniejszy się o 11 466 zł.

8. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń teoretycznych ilościowego zużycia walców podczas procesu walcowania na gorąco prętów można stwierdzić, że wykorzystywany układ wykrojów wpływa na zużycie walców. Wykorzystując do produkcji prętów wykroj owalny pionowy (klatka 9) oszczędność w zużyciu tych walców wynosi 14 742 zł rocznie. Pozwala to również na zmniejszenie zużycia wykroju owalnego poziomego (klatka 10), co wpływa dodatkowo na wzrost oszczędności o 11 466 zł.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że obliczenia te nie uwzględniają kosztów postojów i kosztów energii, związanych częstotliwością przebudowy klatek walcowniczych.

Literatura

1. Danchenko V., Dyja H., Lesik L., Mashkin L., Milenin A.: Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach. Wydawnictwo WIPMiFS Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2002.
2. Mróz S.: Proces walcowania prętów z wzdłużnym rozdzielaniem pasma. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2008.
3. Madej Ł., Węglarczyk S., Pietrzyk M., Analiza wpływu parametrów cyklu produkcyjnego elementów złącznych na zużycie narzędzi, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, Nr 8, 2009, s. 620-622.
4. Mróz S., Szota P., Stefanik A.: Numeryczne modelowanie zużycia wykrojów podczas walcowania kształownika łebkowego HP 220. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 30, nr 3, 2010, 160-168.
5. Byon S. M., Kim S. I., Lee Y.: A semi analytical model for predicting the wear contour in rod rolling process. J. Mat. Proc. Technology, vol. 191, 2007, s. 306 – 309.
6. Archard J. F.: Contact and rubbing of flat surfaces. Journal of Applied Physics, vol.24, nr 8, 1953, s. 981 – 988.
7. Chenot J.L., Fourment L., Coupez T., Ducloux R., Wey E.: Forging and Related Technology. Birmingham, 1998, s. 113.
8. Hoff N.J.: Approximate Analysis of Structures in the Presence of Moderately Large Steps Deformation. Quart, Appl. Mech., 2, 1954, s. 49.
9. Norton F.H.: Creep of Steel at High Temperature. McGraw Hill, New York 1929.
10. FORGE3® Reference Guide Release 6.2, Sophia-Antipolis, November 2002.
11. Smirnov W. K., Shilov V. A., Inatovich J. V.: Kalibrovka prokatnych valkov, Moskva 1987.
12. Szota P., Mróz S., Stefanik A., Dyja H.: Numerical modelling of the working rolls wear during rods rolling process, Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 56, (2/2011), p. 495-501.
13. Dyja H. i inni: Uruchomienie produkcji nowego asortymentu prętów okrągłych gładkich, z zębrowaniem śrubowym, kwadratowych, sześciokątnych, płaskich oraz kształtowych, a także walcówki spełniających wymagania odbiorców i EN - CMC Zawiercie S.A., 2000-2003, raport końcowy z realizacji projektu celowego (niepublikowane).
14. Gaj Ł., Mróz S., Skura D.: Numeryczne modelowanie zużycia wykrojów wydłużających, XIII International Scientific Conference, New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering, Ed. by H. Dyja, A. Kawałek, Series: Monographs No. 24, Czestochowa 2012, s. 506-509.
15. Dyja H., Mróz S., Sygut P., Sygut M.: Technologia i modelowanie procesu walcowania prętów okrągłych o zawężonej tolerancji wymiarowej, Seria: Monografie nr 27, Częstochowa 2012.

Dr hab. inż. Sebastian Mróz, prof. PCz.

Dr inż. Piotr Szota

Mgr inż. Dominika Strycharska

Mgr inż. Łukasz Gaj

Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa

Politechnika Częstochowska

42-201 Częstochowa, ul. J.H. Dąbrowskiego 69

tel./fax: (0-34) 3250-714

e-mail: strycharska@wip.pcz.pl