

# EKONOMICZNY ASPEKT WYKORZYSTANIA WYKROJÓW MODYFIKOWANYCH PODCZAS WALCOWANIA PRĘTÓW OKRĄGLYCH

Mariola SYGUT, Anna KAWAŁEK, Henryk DYJA

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki wpływu zmodyfikowanej technologii walcowania prętów okrągłych o średnicy 14 mm ze stali C45 i X2CrNi19-11 na zużycie walców. Do badań teoretycznych wykorzystano program komputerowy Forge 2008®, oparty na metodzie elementów skończonych (MES), pozwalający na termomechaniczną symulację procesów walcowania w trójosiowym stanie odkształcenia. Do określenia zużycia walców wykorzystano uproszczony model Archarda. Dzięki zastosowaniu nowej, zmodyfikowanej technologii zmniejszyły się siły nacisku metalu na walce w zmodyfikowanych wykrojach podczas walcowania prętów, co wpłynęło na mniejsze zużycie walców roboczych o 10÷20%.

**Słowa kluczowe:** walcowanie, pręty okrągłe, MES, modelowanie numeryczne, zużycie walców roboczych

## 1. Wprowadzenie

Konkurencyjność rynku stawia przed przedsiębiorstwami trudne zadanie w zakresie zapewniania odpowiedniej jakości wyrobów przy jednoczesnym obniżaniu kosztów wytwarzania. Żeby spełnić oczekiwania rynku przedsiębiorstwa muszą poszukiwać nowoczesnych rozwiązań produkcyjnych i dążyć do obniżania kosztów w trakcie procesu produkcyjnego. Minimalizacja kosztów wytwarzania produktu powinna rozpoczynać się już od samego procesu projektowania.

Opracowywane schematy kalibrowania walców powinny zapewniać oprócz otrzymania w linii walcowniczej wyrobu gotowego o wymiarach zgodnych z odpowiednimi normami odbiorczymi, również dużą trwałość narzędzi. Prawidłowo skonstruowane i wykonane narzędzia do przeróbki plastycznej metali powinny także zapewniać dobrą jakość wyrobów gotowych przy dostatecznie dużej wielkości produkcji i niskich kosztach ich wytwarzania [1, 2, 3].

## 2. Matematyczny model wykorzystany w programie komputerowym Forge 2008®

Do rozwiązywania zadań trójwymiarowego plastycznego płynięcia metalu podczas walcowania prętów okrągłych w wykrojach wykorzystano matematyczny model, w którym stan mechaniczny odkształcanego materiału opisano za pomocą prawa Nortona-Hoffa [4, 5, 6], które można wyrazić za pomocą równania:

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

gdzie:  $S_{ij}$  – dewiator tensora naprężeń,

$\dot{\varepsilon}$  – intensywność prędkości odkształcenia,  
 $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – tensor prędkości odkształcenia,  
 $\varepsilon$  – intensywność odkształcenia,  
 $T$  – temperatura,  
 $K$  – konsystencja zależna od naprężenia uplastyczniającego  $\sigma_p$ ,  
 $m$  – współczynnik charakteryzujący odkształcenie metalu na gorąco ( $0 < m < 1$ ).

Podczas przeróbki plastycznej metali występuje zużycie narzędzi. Najczęściej występującym typem zużycia w tych procesach jest zużycie ściernie [7]. Do opisu zużycia ściernego często stosowany jest model Archarda [8]. W modelu tym założono, że w warunkach zużycia ściernego objętość materiału  $V_z$  oddzielonego od jednostkowej powierzchni narzędzia jest wprost proporcjonalna do naprężenia normalnego  $\sigma_n$  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:

$$V_z = k_{zuz} \frac{\sigma_n L_t}{H} \quad (2)$$

gdzie:  $k_{zuz}$  – współczynnik zużycia.

Równanie (2) może być przedstawione w formie całkowej do rozwiązania za pomocą algorytmu opartego na MES:

$$V_z = k_{zuz} \int_0^t \frac{\sigma_n \cdot v_s}{H(T)} dt \quad (3)$$

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

Parametry  $\sigma_n$ ,  $v_s$  oraz  $T$  są traktowane jako zmienne w czasie podczas procesu przeróbki plastycznej, dla każdego punktu na powierzchni narzędzia. Parametry te wyznaczono za pomocą trójwymiarowego modelu matematycznego opartego na metodzie elementów skończonych, w którym stan mechaniczny odkształcanego materiału opisano za pomocą prawa Nortona-Hoffa [4, 9].

Żeby rozwiązać równanie (3) należy znać wartość współczynnika zużycia  $k_{zuz}$  i twardość narzędzia  $H$ . Do 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 (3).

Pominięcie wpływu współczynnika zużycia  $k_{zuz}$  i wpływu temperatury na twardość narzędzia pozwoli wykorzystać równanie (3) tylko do celów porównawczych. Dlatego w modelu stosowanym w programie komputerowym Forge2008® równanie (3) uproszczono do postaci:

$$W = \int_0^t \sigma_n \cdot v_s dt \quad (4)$$

Ponieważ naprężenie tarcia  $\tau_j$  jest iloczynem naprężenia normalnego  $\sigma_n$  i współczynnika tarcia  $\mu$ , więc całka  $\int_0^t \sigma_n \cdot v_s dt$  ma sens fizyczny i jest równa jednostkowej 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 [10]. Model ten można jednak wykorzystywać do celów porównawczych, np. jeżeli podczas modelowania takich samych procesów wprowadzimy modyfikację narzędzia, opracowany model pozwala na uzyskanie odpowiedzi, które z narzędzi będzie bardziej trwałe.

### 3. Materiał i metodyka badań

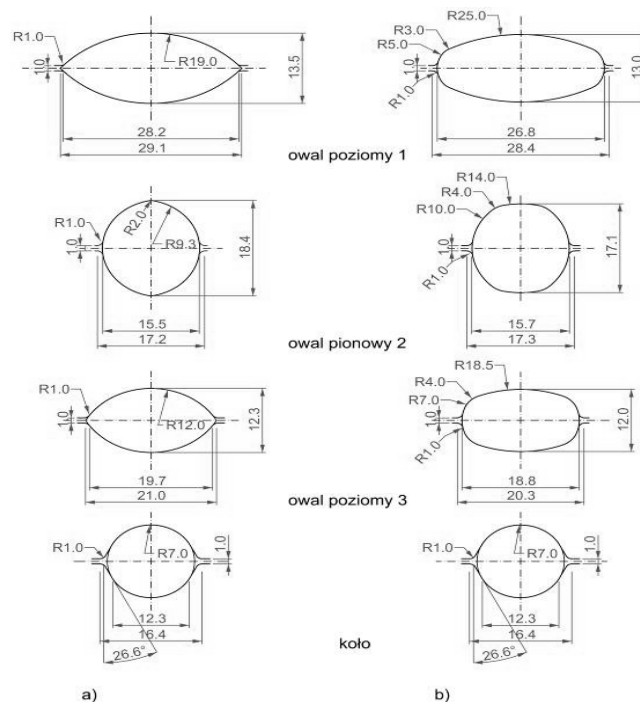
Do numerycznego modelowania procesu walcowania prętów okrągłych o średnicy 14 mm z wsadu o średnicy 22 mm w czterech klatkach wykańczających walcowni bruzdowej, przyjęto dwa schematy kalibrowania walców. Na rys. 1 przedstawiono kształt i wymiary wykrojów zastosowanych podczas procesu walcowania. Wariant I przedstawia wykroje klasyczne, których kształt i wymiary opracowano zgodnie z ogólnymi zasadami konstrukcji wykrojów do walcowania prętów okrągłych w systemie owal – owal pionowy – owal – koło. W wariantcie II w wykrojach owalnych 1b, 2b i 3b (rys. 1) zostały wprowadzone modyfikacje kształtów i wyznaczone w sposób konstrukcyjny nowe wymiary wykrojów. Projektując kształt wykrojów modyfikowanych wykorzystano podobieństwo pól powierzchni wykrojów modyfikowanych z polami powierzchni wykrojów klasycznych [11]. Wykrój wykańczający - kołowy (rys. 1) w obydwu wariantach posiadał taką samą konstrukcję. Aby otrzymać pręty o podwyższonej dokładności wymiarowej, wykrój okrągły wykonano z pochyleniem jego bocznych ścian [2, 12].

Materiałami zastosowanymi do badań były stale z gatunków C45 i X2CrNi19-11 zgodnych z normami PN-EN 10083-2:1999 i PN-EN 10088-1:2005. Skład chemiczny badanych stali przedstawiono w tabeli 1.

**Tab. 1.** Skład chemiczny stali przyjętych do numerycznego modelowania

Gatunek stali	Zawartość pierwiastków [%]											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Al	Cu	Sn
C45	0,45	0,64	0,21	0,015	0,031	0,13	0,14	0,04	-	0,004	0,25	0,015
X2CrNi19-11	0,03	2,00	0,24	0,045	0,03	19,0	11,0	0,75	0,10	-	-	-

Do teoretycznej analizy procesu walcowania prętów okrągłych przyjęto następujące parametry początkowe: średnicę walców  $D = 150$  mm, temperaturę walcowanego pasma założono jako jednorodną w całej jego objętości i równą  $1000$  °C dla stali C45 i  $1050$  °C (stal X2CrNi19-11), prędkość walcowania równą  $0,2$  m/s, temperaturę walców  $T_w = 25$  °C; temperaturę otoczenia  $T_{otocz} = 20$  °C; współczynnik kontaktowego przewodzenia ciepła między walcami a pasmem  $\alpha = 3000$  W/ m<sup>2</sup>K; współczynnik przejmowania ciepła między pasmem a powietrzem  $\alpha_{pow} = 100$  W/ m<sup>2</sup>K; współczynnik przewodności cieplnej  $35,5$  W/(m·K); ciepło właściwe  $778$  J/(kg·K); gęstość stali  $7850$  kg/m<sup>3</sup>; emisyjność  $0,88$ .

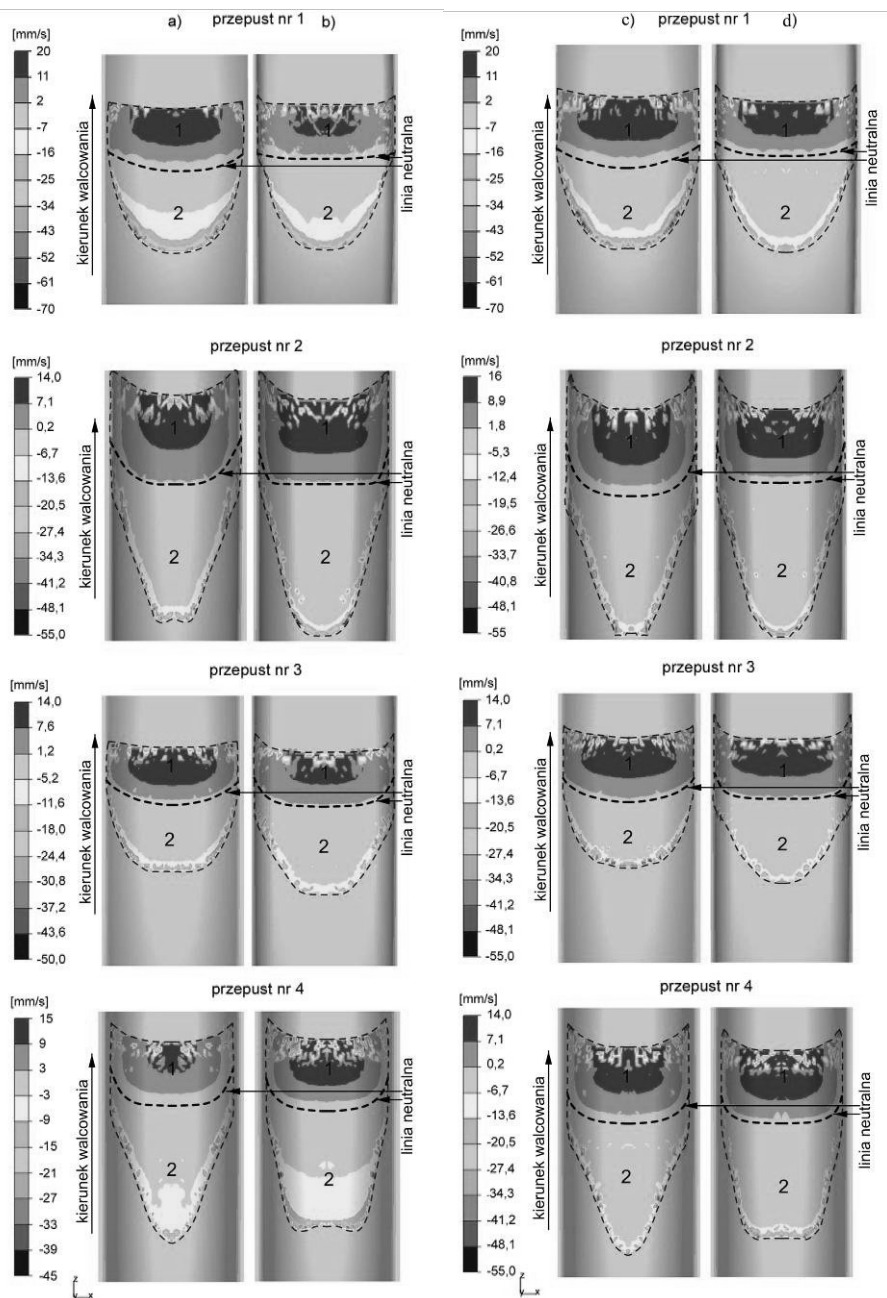


Rys. 1. Kształt i wymiary wykrojów stosowanych podczas procesu walcowania:  
 a) wariant I - wykroje klasyczne, b) wariant II - wykroje modyfikowane [11]

#### 4. Analiza zużycia wykrojów podczas walcowania prętów okrągłych

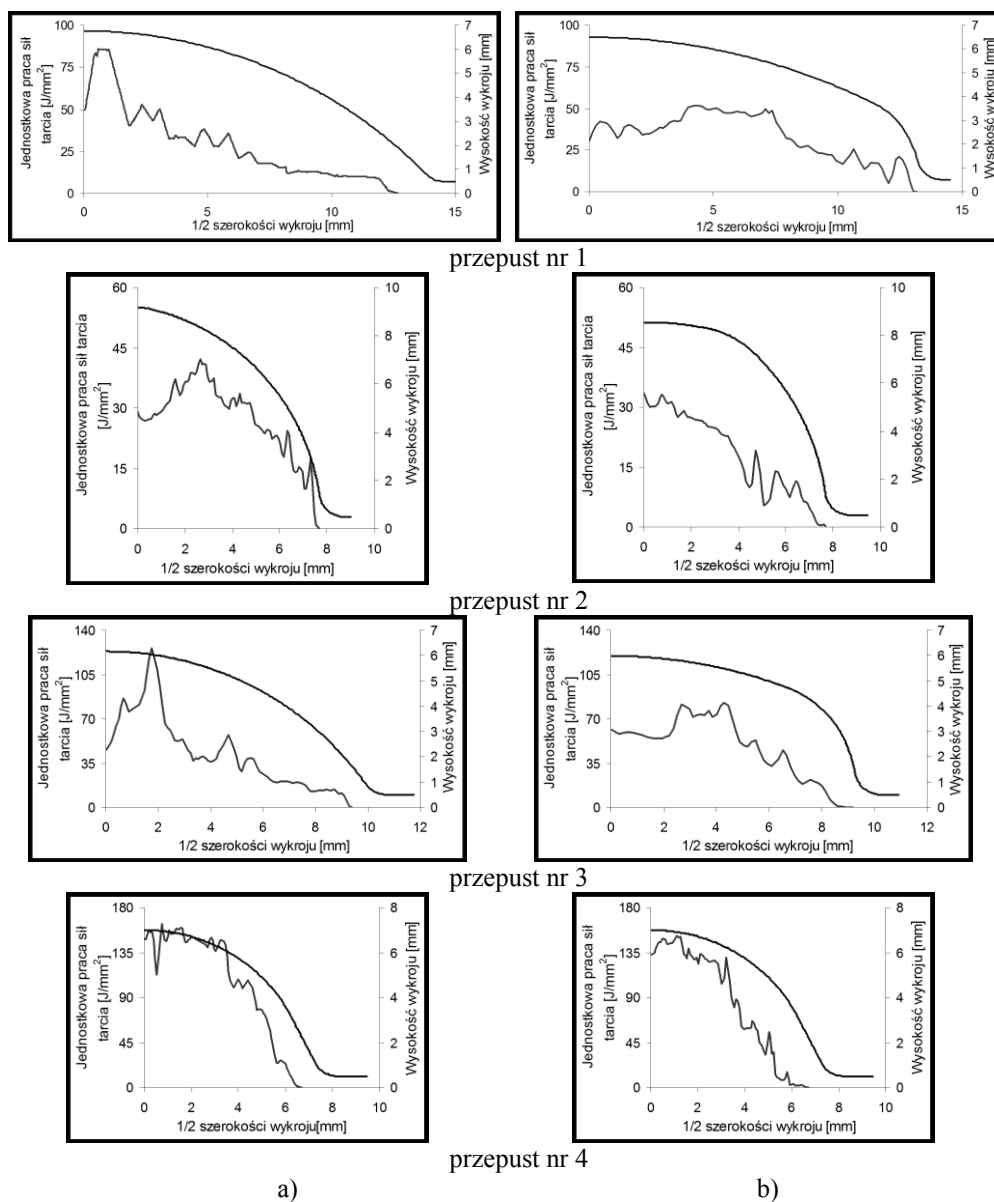
Zużywanie się wykrojów podczas procesu walcowania wpływa na zwiększenie odchyłek wymiarowych gotowego wyrobu. Jednym z ważniejszych czynników wpływających na zużycie wykrojów podczas odkształcania metalu jest poślizg pomiędzy metalem a narzędziem. Na powierzchni styku metalu z narzędziem występują zmienne prędkości poślizgów [13, 14], wpływające na mechanizm tarcia. Na rys. 2 i 3 przedstawiono wyniki numerycznego modelowania prędkości poślizgu metalu ( $v_s$ ) na powierzchni styku metalu z walcem z wyznaczonymi strefami opóźnienia i wyprzedzenia.

Analizując przedstawione na rys. 2 rozkłady prędkości poślizgu  $v_s$  na powierzchni styku metalu z walcem można stwierdzić, że dla stref opóźnienia prędkość plastycznego płynięcia metalu była mniejsza od poziomej obwodowej prędkości walców  $v_{wz}$  średnio o około 45÷70 mm/s (dla poszczególnych przepustów), niezależnie od zastosowanego typu wykrojów. Porównując kształty i obszary rozkładów prędkości poślizgu  $v_s$  w strefach opóźnienia można stwierdzić, że analizowane wielkości mogą wpływać na bardziej nierównomierne zużywanie się wykrojów klasycznych w ich dnie (przepust nr 2 i 4, rys. 2). W strefie wyprzedzenia prędkość poślizgu na powierzchni styku metalu z walcem jest mniejsza podczas walcowania w przepustach nr 1÷3 według wariantu II. Jedynie podczas procesu walcowania w przepuszcie nr 4 według wariantu II, prędkości poślizgu na powierzchni styku metalu z walcem są większe, ponieważ pasmo wprowadzane do wykroju wykańczającego ma większe pole przekroju poprzecznego, a tym samym większy współczynnik wydłużenia.

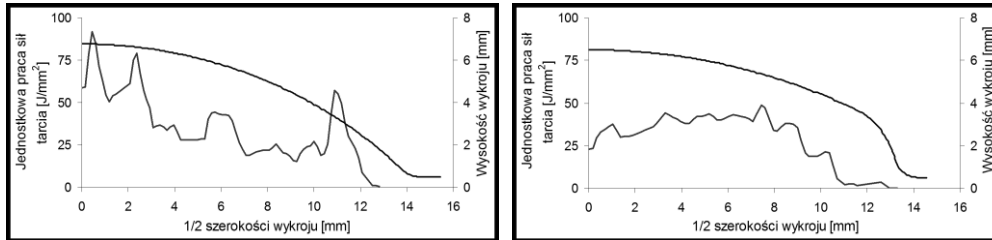


Rys. 2. Rozkład prędkości poślizgu  $v_s$  na powierzchni styku metalu z walcem podczas procesu walcowania prętów okrągłych o średnicy 14 mm w: a) wykrojach klasycznych (wariant I), stal C45; b) wykrojach modyfikowanych (wariant II), stal C45; c) wykrojach klasycznych (wariant I), stal X2CrNi19-11; d) wykrojach modyfikowanych (wariant II), stal X2CrNi19-11; 1 – strefa wyprzedzenia, 2 – strefa opóźnienia

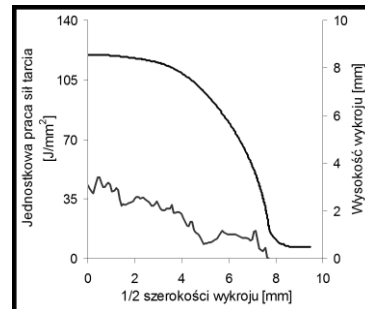
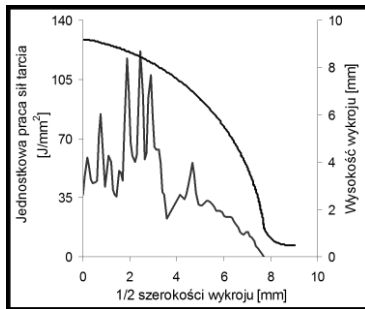
Na rys. 3 i 4 przedstawiono rozkład jednostkowej pracy siły tarcia na szerokości wykroju w procesie walcowania prętów okrągłych wg wariantów I i II.



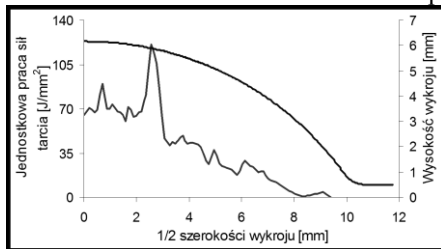
Rys. 3. Rozkład jednostkowej pracy siły tarcia na szerokości wykroju podczas procesu walcowania prętów okrągłych ze stali C45 w: a) wykrojach klasycznych (wariant I), b) wykrojach modyfikowanych (wariant II)



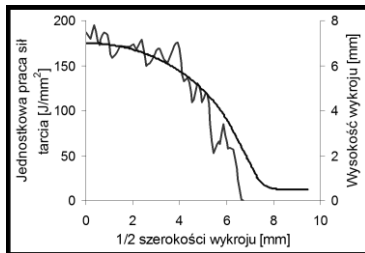
przepust nr 1



przepust nr 2



przepust nr 3



przepust nr 4

a)

b)

Rys. 4. Rozkład jednostkowej pracy sił tarcia na szerokości wykroju podczas procesu walcowania prętów okrągłych ze stali X2CrNi19-11 w: a) wykrojach klasycznych (wariant I), b) wykrojach modyfikowanych (wariant II)

Podczas procesu walcowania prętów okrągłych w przepustach nr 1÷3 w wykrojach modyfikowanych (wariant II) rozkład jednostkowej pracy sił tarcia dla badanych gatunków stali jest bardziej równomierny na szerokości wykrojów, w porównaniu do walcowania w wykrojach klasycznych (wariant I). Wyraźny wzrost jednostkowej pracy sił tarcia na szerokości wykroju w jego dnie, nawet około 100 %, wystąpił podczas walcowania

w wykrojach klasycznych w przepustach nr 1÷3 (rys. 3a i 4a), co może spowodować większe zużycie wykrojów w miejscach o największych wartościach analizowanej wielkości. W przypadku procesu walcowania w ostatnim przepuście otrzymano niższe wartości jednostkowej pracy sił tarcia na szerokości wykroju, średnio o około 10 %, dla procesu walcowania według wariantu II (rys. 3b i 4b). Podczas walcowania pasma w wykroju gotowym według wariantu I zużycie walców w dnie wykroju jest większe, ponieważ w momencie chwytu pasma przez walce w wykroju okrągłym styk pasma z walcami następuje tylko w jednym punkcie. W momencie chwytu pasma przez walce w wykroju wykańczającym, podczas procesu walcowania według wariantu II, następuje zwiększenie długości styku pasma z walcami w płaszczyźnie wejścia do kotliny walcowniczej, co zapewnia bardziej równomierne i mniejsze zużycie wykroju.

Na podstawie otrzymanych wyników badań numerycznych można stwierdzić, że poprzez zastosowanie wykrojów modyfikowanych nastąpiło znaczne zmniejszenie ich zużywania się, w porównaniu z zużyciem wykrojów klasycznych.

Model zużycia stosowany w programie komputerowym Forge2008® nie pozwala na ilościową ocenę zużycia walców a jedynie na analizę porównawczą. W celu wykorzystania wyników symulacji z zastosowaniem uproszczonego modelu Archarda, do ilościowej oceny zużycia walców, konieczne jest zdefiniowanie współczynnika zużycia i twardości narzędzia w funkcji temperatury.

W pracach [15, 16] przedstawiono metodykę wyznaczania ilościowego zużycia narzędzi na podstawie wyników obliczeń numerycznych jednostkowej pracy sił tarcia otrzymanych za pomocą programu Forge2008®.

W celu możliwości ilościowego określenia zużycia narzędzi należy równanie (3) przekształcić do postaci:

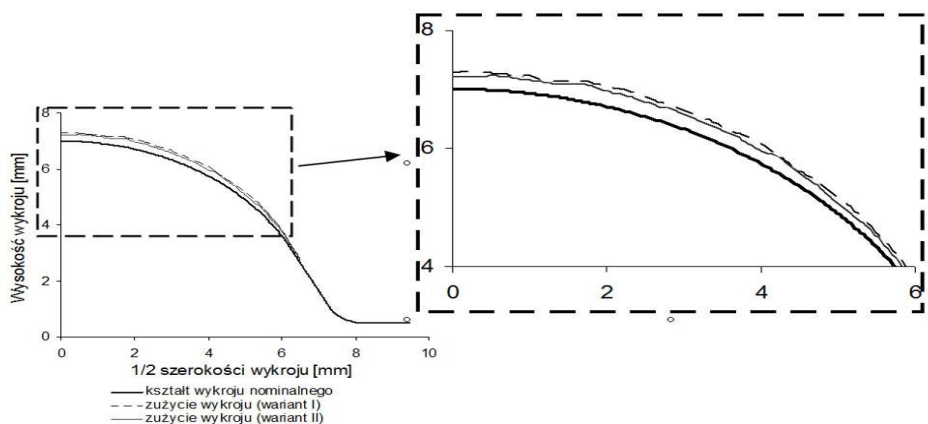
$$V_z = \frac{k_{zuz}}{HV} \int_0^t \sigma_n v_s dt \quad (5)$$

gdzie:  $HV$  – twardość Vickersa.

Zakładając, że w procesie walcowania twardość walców nie zależy od ich temperatury (twardość narzędzia w zakresie temperatur 20-100°C może ulegać nieistotnym zmianom), to wyrażenie  $H(T)$  w równaniu (3) 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 stalowych wynosiła 400  $HV$ . Twardość taką przyjęto na podstawie charakterystyki technicznej walców dostarczonej przez producenta.

W równaniu (5) istotnym czynnikiem wpływającym na wartość zużycia jest współczynnik  $k_{zuz}$ . W dostępnej literaturze technologicznej współczynnik ten w zależności od warunków stosowanych narzędzi osiąga wartość w przedziale od  $0,5 \cdot 10^{-5}$  do  $0,8 \cdot 10^{-7}$  [ $\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]. Obliczony w pracy [15] współczynnik zużycia  $k_{zuz}$ , który wynosi  $6,74 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$  został wykorzystany do wyznaczenia ilościowego zużycia walców za pomocą równania (5). Podstawiając otrzymane wartości jednostkowej pracy sił tarcia, twardość walca oraz obliczoną wartość współczynnika zużycia walców wyznaczono teoretyczny kształt wykroju gotowego po odwalcowaniu 100 Mg prętów ze stali C45. Na rys. 5 przedstawiono teoretyczny kształt wykrojów po walcowaniu pasm ze stali C45 według wariantu I i II, w porównaniu do kształtu wykroju nominalnego.





Rys. 5. Zużycie wykroju wykańczającego podczas walcowania prętów ze stali C45 według wariantu I i II

Wyznaczenie ilościowego zużycia wykroju gotowego (zmiany geometrii walców podczas ich eksploatacji) pozwoliło na określenie masy wyrobu finalnego spełniającego wymagania określone tolerancjami wymiarowymi. Dla stali C45 podczas procesu walcowania z zastosowaniem wykrojów klasycznych (wariant I) maksymalna masa przewalcowanych wyrobów zgodnych z normą odbiorczą wyniosła ok. 100 Mg, natomiast dla procesu walcowania z zastosowaniem wykrojów modyfikowanych (wariant II) wyniosła ok. 110 Mg. W przypadku stali X2CrNi19-11 dla procesu walcowania w wykroju wykańczającym dla wariantu I masa przewalcowanych prętów wyniosła ok. 70 Mg, a dla wariantu II – ok. 86 Mg. Na mniejszą masę wytworzonych wyrobów ze stali X2CrNi19-11 wpłynęła większa wartość jednostkowej pracy sił tarcia na szerokości wykroju, która zależy od większej wartości naprężenia uplastyczniającego tej stali, w porównaniu do stali C45.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki teoretycznych badań procesu walcowania prętów okrągłych o średnicy 14 mm ze stali C45 i X2CrNi19-11 z zastosowaniem dwóch schematów kalibrowania walców. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że walcowanie prętów okrągłych z zastosowaniem wykrojów modyfikowanych wpływa na mniejsze zużycie walców roboczych o około 10÷20% w porównaniu z walcowaniem w wykrojach klasycznych. Dzięki temu można wydłużyć kampanię walcowniczą, skrócić czas postojów przeznaczony na wymianę walców, oraz obniżyć koszty regeneracji walców. Mniejsze jednostkowe zużycie walców podczas procesu walcowania w wykrojach modyfikowanych, w przeliczeniu na masę wytworzonych wyrobów gotowych wpłynie na obniżenie jednostkowych kosztów produkcji prętów okrągłych w walcowni ciągłej.

## Literatura

1. 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.

2. Danchenko V., Dyja H., Lesik L., Mashkin L., Milenin A.: Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach. Politechnika Częstochowska, Metalurgia nr 28, Częstochowa 2002.
3. Mróz S., Szota P., Stefanik A.: Numeryczne modelowanie zużycia wykrojów podczas walcowania kształownika łebkowego HP 220. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, vol. 30, nr 3, 2010, s. 160 – 168.
4. Chenot J.L., Fourment L., Coupez T., Ducloux R., Wey E.: Forging and Related Technology. Birmingham, 1998, s. 113.
5. Hoff N.J.: Approximate Analysis of Structures in the Presence of Moderately Large Steps Deformation. Quart, Appl. Mech., 2, 1954, s. 49.
6. Norton F.H.: Creep of Steel at High Temperature. McGraw Hill, New York 1929.
7. Kocańda A.: Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali. Informatyka w technologii metali, praca zbiorowa pod redakcją A. Pielki, F. Grosmana, J. Kusiaka, M. Pietrzyka, Gliwice 2003, s. 148-188.
8. Archard J. F.: Contact and rubbing of flat surfaces. Journal of Applied Physics, vol. 24, nr 8, 1953, s. 981 – 988.
9. Gavrus A, Massoni E, Chenot J.L.: An inverse analysis using a finite element model for identification of rheological parameters. Journal of Materials Processing Technology, vol. 60, 1996, s. 447.
10. Lesik L., Dyja H., Mróz S.: Inter-stand deformation of strip during the rolling process. The Chinese Society for Metals CSM 2001 Annual Meeting Proceedings, Beijing, 2001, s. 350-354.
11. Sygut M.: Teoretyczno doświadczalna analiza procesu walcowania w modyfikowanych wykrojach wydłużających. Praca doktorska, Częstochowa 2011.
12. Lesik L., Mróz S., Dyja H.: Wytwarzanie prętów okrągłych w zawężonym zakresie tolerancji wymiarowej. Materiały Konferencyjne II Międzynarodowej Sesji Naukowej pt.: Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Seria: Metalurgia nr 19, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, s. 65-68.
13. Celikov A. I., Grishkov A. I.: Teorija prokatki. Metallurgija, Moskva 1970.
14. Mróz S.: Proces walcowania prętów z wzdłużnym rozdzieleniem pasma. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Seria MONOGRAFIE nr 138, Częstochowa 2008.
13. 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), s. 495-501.
14. Szota P., Mróz S., Stefanik A.: Numeryczne modelowanie zużycia ciągadeł podczas ciągnięcia drutu okrągłego. Hutnik-Wiadomości hutnicze, nr 1, 2011, s. 138-141.

Dr inż. Mariola Sygut  
 Dr hab. inż. Anna Kawalek, prof. PCz  
 Prof. dr hab. inż. Henryk Dyja  
 Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii  
 Bezpieczeństwa  
 Politechnika Częstochowska  
 42-201 Częstochowa, ul. Dąbrowskiego 69

tel./fax: (0-34) 325 07 84  
 e-mail: kawalek@wip.pcz.pl  
 dyja@wip.pcz.pl