

MODELOWANIE NUMERYCZNE PROCESU TRÓJŻYŁOWEGO WALCOWANIA PRĘTÓW ŻEBROWANYCH O ŚREDNICY 16 MM

Dominika STRYCHARSKA, Marzena OGÓREK

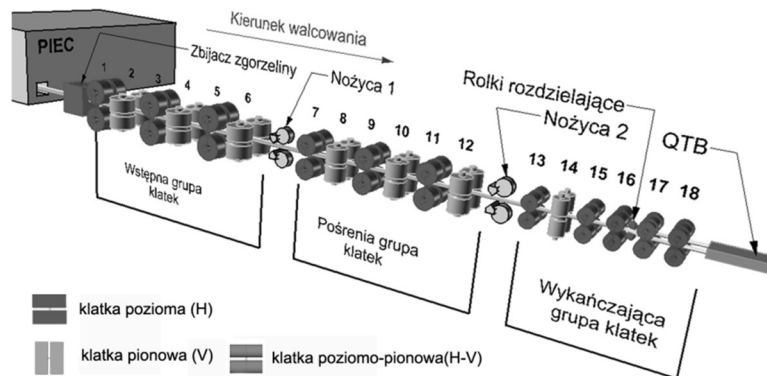
Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki numerycznego modelowania procesu walcowania prętów żebrowanych o średnicy 16 mm walcowanych w technologii trójżyłowej w obecnie stosowanym i nowo zaprojektowanym układzie wykrojów. Badania teoretyczne przeprowadzono w celu przeanalizowania zmian kształtu i wymiarów przekroju poprzecznego pasma oraz rozkładu intensywności odkształcenia podczas trójżyłowego walcowania prętów żebrowanych. W niniejszej pracy do analizy procesu walcowania z wzdłużnym rozdzielaniem pasma wykorzystano program komputerowy Forge2011®.

Słowa kluczowe: walcowanie w wykrojach, kalibrowanie walców, pręty żebrowane, modelowanie numeryczne

1. Wstęp

Na rynkach światowych obserwuje się stałe zapotrzebowanie na pręty żebrowane do zbrojenia betonu. Nabywcy wymagają, aby wyroby miały odpowiednią strukturę, odpowiednie wymiary, które m.in. uzależnione są od zastosowanych kształtów układu 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]. Obecnie standardem jest walcowanie prętów żebrowanych z zastosowaniem technologii wzdłużnego rozdzielania pasma w ciągu walcowniczym. Wiąże się to z wykorzystaniem w linii walcowniczej dwóch wykrojów rozcinających kształtujących pasmo na oddzielne żyły, które następnie rozdzielane jest w nienapędzanych rolkach rozdzielających i dalej walcowane oddzielnie na gotowe pręty żebrowane [4, 5]. Proces ten charakteryzuje się intensywnym zużyciem się walców z wykrojami rozcinającymi. W celu zmniejszenia ich zużycia opracowano nowy sposób kalibrowania walców dla prętów żebrowanych o średnicy 16 mm, walcowanych w technologii trójżyłowej [2, 6, 7]. Założenia przyjęte do modyfikacji układu wykrojów rozcinających, warunki brzegowe oraz parametry początkowe procesu wraz z modelem matematycznym szczegółowo opisano w pracach [2, 8, 9].

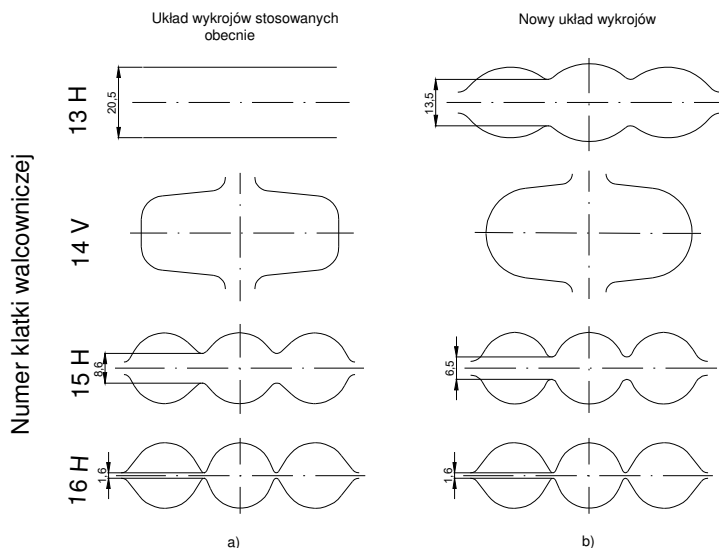
Celem pracy było opracowanie nowego układu wykrojów rozcinających, który zapewni mniejsze zużycie walców oraz analiza rozkładu odkształceń i zmian kształtu pasma w poszczególnych przepustach. W badaniach teoretycznych uwzględniono zarówno klasyczny układ wykrojów rozcinających – z dwoma wykrojami, jak również nowy – z zastosowaniem 3 wykrojów rozcinających. Nowe kalibrowanie walców opracowano dla warunków jednej z polskich 18-klatkowej walcowni ciągłej prętów D350 (rys. 1). Do modelowania numerycznego procesu walcowania zastosowano program komputerowy Forge2011® [10].



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia podstawowych urządzeń linii walcowniczej analizowanej walcowni ciągłej prętów D350
Źródło: [2]

2. Charakterystyka nowego układu wykrojów rozcinających

W ramach pracy zaprojektowano nowy układ wykrojów rozcinających do walcowania prętów żebrowanych o średnicy 16 mm w technologii trójżyłowej. Podstawą do opracowania nowego układu wykrojów były wyniki wcześniejszych badań dotyczące modyfikacji układu wykrojów rozcinających do walcowania prętów żebrowanych o średnicy 12 mm w technologii czterożyłowej [2, 6]. Nowością rozwiązania, również w tym przypadku, było zastosowanie dodatkowego, trzeciego wykroju wstępnie rozcinającego oraz wykroju osadczego z zaokrąglonym dnem brzozy (rys. 2).



Rys. 2. Układ wykrojów rozcinających do trójżyłowego walcowania prętów żebrowanych o średnicy 16 mm: a) obecnie stosowany, b) nowy; H – klatka walców poziomych, V – klatka walców pionowych

Zmiany, które zastosowano w nowym układzie wykrojów rozcinających przedstawiono na rysunku 2. Polegały one na zwiększeniu liczby wykrojów rozcinających do trzech oraz zastosowaniu specjalnego wykroju osadczego [2, 6, 8].

Pierwszy wykrój rozcinający (rys. 2b), którego zadaniem jest wstępny podział pasma na 3 żyły wprowadzono w miejsce wykroju typu "płaska beczka" (rys. 2a) w klatce 13. Tradycyjny wykrój osadczy (z płaskim dnem) w klatce 14 (rys. 2a) został zmieniony na wykrój osadczy z zaokrąglonym dnem (rys. 2b), który stosowany jest do produkcji prętów płaskich o zaokrąglonych narożach. Zastosowanie takiego wykroju zapewni większą możliwość sterowania szerokością wstępnie podzielanego pasma w klatce 15, co jest szczególnie istotne podczas przesunięcia pionowej osi pasma względem pionowej osi wykroju wstępnie rozcinającego. Zmian dokonano także w wykroju wstępnie rozcinającym (klatka 15, rys. 2b). Dzięki zastosowaniu wykroju wstępnie rozcinającego już w klatce 13 (rys. 2b), możliwe było zwiększenie wcięć części nożowych bruzdy wykroju. Taki kształt wykroju w klatce 15 (rys. 2b) znacznie odciąża wykrój rozcinający w klatce 16 (rys. 2b) w porównaniu do układu wykrojów stosowanych obecnie (rys. 2a). Wykrój rozcinający (klatka 16) w obu układach jest taki sam [2, 6, 8].

Zmiana wysokości grzebieni w wykrojach rozcinających wpłynęła na zmniejszenie wartości gniotu pasma w tych częściach bruzdy wykroju, dzięki czemu nastąpiło mniejsze zużycie tych obszarów wykroju (klatki 15 i 16), rys. 2b. W tradycyjnym procesie walcowania z wzdłużnym rozdzielaniem pasma stosowany jest duży gniot w obszarach pasma stykających się z częściami nożowymi wykrojów rozcinających (klatki 15 i 16), rys. 2a. Znaczny gniot wywołany częściami nożowymi wykroju rozcinającego stosowany jest w celu ukształtowania mostków w paśmie wielożyłowym o wysokości, która będzie pozwalała na poprawny podział pasma w nienapędzanych rolkach rozdzielających [2, 8, 9].

3. Materiał i parametry początkowe przyjęte do obliczeń numerycznych

Materiałem wykorzystanym do badań trójżyłowego procesu walcowania prętów żebrowanych o średnicy 16 mm była stal w gatunku BSt500S. Jest to jeden z najczęściej stosowanych gatunków stali, z którego produkowane są pręty żebrowane stosowane do zbrojenia konstrukcji i elementów żelbetowych, projektowanych według zasad określonych w PN-EN 1992-1-1:2008 [11]. Skład chemiczny zastosowanej stali przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Skład chemiczny stali w gatunku BSt500S użytej do badań

Analiza wytopowa	Zawartość [%]						
	C	Mn	Si	P	S	N	Cu
	0,17	0,64	0,14	0,022	0,016	0,0104	0,25

Zastosowanie do modelowania procesów przeróbki plastycznej metod numerycznych wymaga zdefiniowania warunków początkowych, decydujących o poprawności wyników obliczeń. Do przeprowadzenia obliczeń numerycznych założono następujące warunki początkowe oraz parametry procesu walcowania:

- średnica rolek rozdzielających $D_{rr} = 164$ mm;
- temperatura narzędzi – 60°C;
- temperatura otoczenia – 20°C;

- w obliczeniach numerycznych zastosowano mieszany model tarcia: Coulomba i Treski, dla którego współczynnik tarcia wynosił $\mu = 0,3$, a czynnik tarcia $m = 0,7$ [3];
- współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziem – $\alpha_{narz} = 3000$ [W/(Km²)];
- współczynnik wymiany ciepła między materiałem a powietrzem – $\alpha_{pow} = 10$ [W/(Km²)];
- wsadem do walcowania był wstępniak o wymiarach 160 x 160 mm ze stali w gatunku BSt500S;
- prędkość walcowania w ostatniej klatce $V_w = 9,13$ m/s;
- temperatura początkowa wsadu wynosiła 1150°C.

W celu dokładnego odwzorowania rzeczywistego rozkładu temperatury w modelu wlewka ciągłego wykonano modelowanie numeryczne jego chłodzenia przed pierwszą klatką walcowniczą zgodnie z parametrami analizowanej walcowni. Na podstawie otrzymanych wyników badań teoretycznych zaobserwowano znaczne przechłodzenie powierzchni wsadu o około 100°C, w porównaniu do temperatury wsadu po wyjściu z pieca pokrocznego. Otrzymane wyniki badań teoretycznych zweryfikowano za pomocą pomiarów kamerą termowizyjną rozkładu temperatury na długości wsadu przed pierwszą klatką walcowniczą. Zmierzone wartości temperatury na powierzchni wlewka ciągłego przed pierwszą klatką walcowniczą były zbliżone do wartości otrzymanych w wyniku modelowania numerycznego i wynosiły około 1040°C.

W prowadzonych badaniach przyjęto, że twardość walców żeliwnych wynosi 480 HV. Twardość taką przyjęto na podstawie charakterystyki technicznej walców dostarczonej przez producenta walców.

W celu zwiększenia szybkości i dokładności obliczeń analizę teoretyczną procesu wielożyłowego walcowania prętów żebrowanych przeprowadzono dla 1/4 przekroju poprzecznego pasma i dla symetrycznej połowy jednego z walców. Ze względu na fakt, iż kształt przekroju poprzecznego walcowanego pasma cechował się symetrią w dwóch płaszczyznach, możliwe było wykorzystanie takiego uproszczenia.

4. Wyniki badań i ich analiza

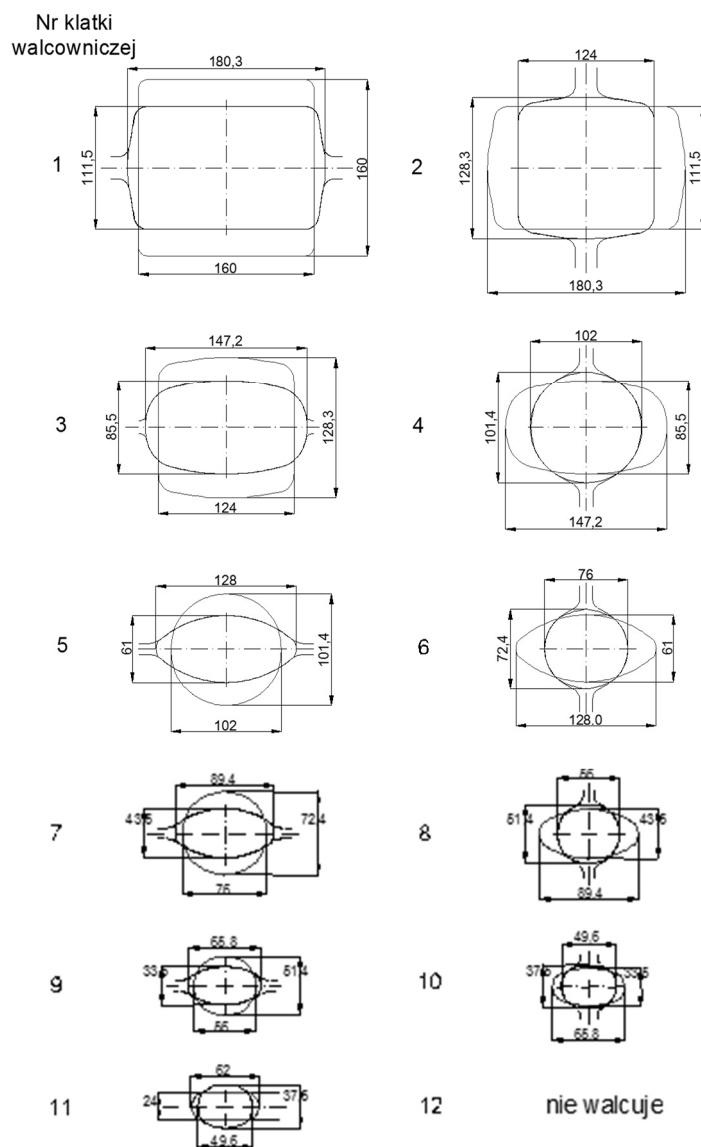
Na podstawie otrzymanych wyników symulacji numerycznych procesu walcowania prętów żebrowanych o średnicy 16 mm walcowanych w technologii trójżyłowej, wykonano przekroje poprzeczne pasm po poszczególnych przepustach w płaszczyźnie wyjścia z kotłiny walcowniczej w układzie wykrojów stosowanym obecnie i nowym (rys. 3 - 5).

Analizując otrzymane wyniki obliczeń numerycznych można stwierdzić, że kalibrowanie walców zostało poprawnie opracowane. W wyniku modelowania numerycznego uzyskano prawidłowe wypełnienie poszczególnych wykrojów, zarówno podczas trójżyłowego walcowania prętów żebrowanych w układzie wykrojów stosowanym obecnie jak i nowym układzie wykrojów.

Na rys. 6b pokazano widok pręta okrągłego, żebranego o średnicy 16 mm otrzymanego w technologii trójżyłowej. Analizując powyższy rysunek można stwierdzić prawidłowe wypełnienie wykroju oraz kształt żebra wzdłużnego.

Analizując dane pokazane na rys. 6a można stwierdzić dużą zgodność otrzymanych wymiarów pręta żebranego o średnicy 16 mm z wymaganiami normami [11-13]. Otrzymany okrągły pręt żebrany po wykroju gotowym cechuje się poprawną szerokością i wysokością jak również odpowiednią wysokością żeber wynoszącą 1 mm,

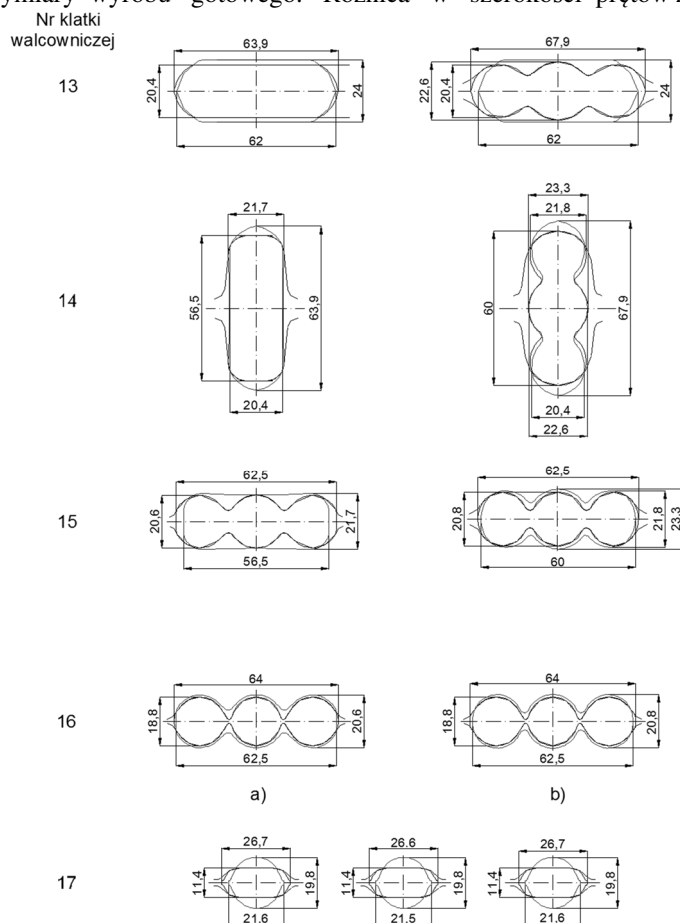
co odpowiadało całkowitemu wypełnieniu bruzd żeber. Wysokość żeber na obwodzie rdzenia jest równomierna.



Rys. 3. Kształt i wymiary pasma otrzymane podczas symulacji komputerowej walcowania w wykrojach stosowanych obecnie (wstępna i pośrednia grupa klatek)

Otrzymane wyniki badań numerycznych wykazały, że podczas rozdzielania pasma występuje nierównomierny podział na trzy żyły. Żyły skrajne cechują się nieznacznie większym polem przekroju poprzecznego w stosunku do pola przekroju poprzecznego żyły

środkowej (rys. 5). Otrzymana nieznaczna nierównomierność nie miała istotnego wpływu na kształt i wymiary wyrobu gotowego. Różnica w szerokości prętów zębrowanych

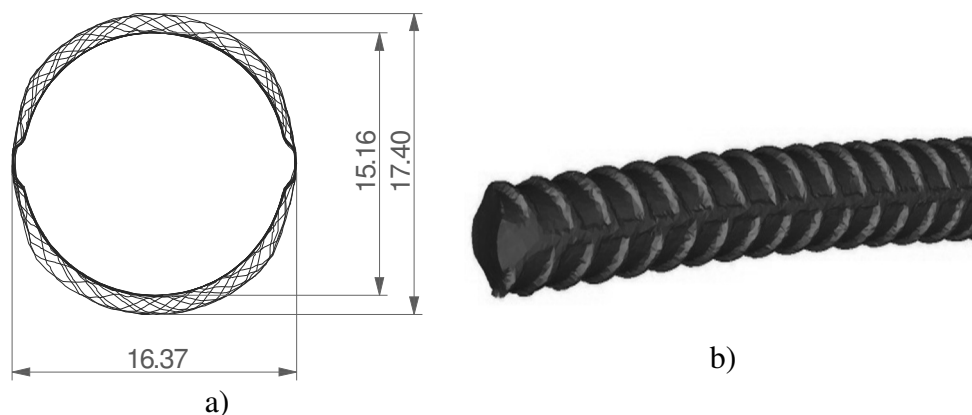


Rys. 5. Kształt i wymiary pasma otrzymane podczas symulacji komputerowej walcowania w wykrojach: a) stosowanych obecnie, b) nowych (wykańczająca grupa klatek)

walcowanych z żyły środkowej i żył skrajnych wynosiła 0,1 mm, stąd też na rys. 4a ograniczono się do analizy kształtu i wymiarów pręta gotowego otrzymanego z żyły środkowej. Przeprowadzenie modelowania numerycznego potwierdziło poprawność opracowanego kalibrowania walców.

Wymiary pasm oraz współczynniki wydłużenia w poszczególnych przepustach, otrzymane w wyniku symulacji numerycznych procesu trójżyłowego walcowania prętów zębrowanych o średnicy 16 mm przedstawiono w tabeli 2.

Do analizy procesu walcowania prętów zębrowanych o średnicy 16 mm w technologii trójżyłowej brano tylko pod uwagę klatki 13÷16, dla których opracowano nowy układ wykrojów. W pozostałych klatkach założono, że wymiary pasma jak i współczynniki wydłużenia są takie same dla obu wariantów walcowania.



Rys. 6. Widok pręta żebrowanego o średnicy 16 mm uzyskanego w wyniku symulacji komputerowej: a) przekrój poprzeczny, b) widok ogólny

Tab. 2. Wyniki obliczeń numerycznych procesu trójżyłowego walcowania prętów żebrowanych o średnicy 16 mm

Numer klatki walcowniczej	Układ wykrojów rozcinających stosowany obecnie				Nowy układ wykrojów rozcinających			
	Wymiary pasma [mm]		Pole przekroju poprzecznego [mm ²]	λ	Wymiary pasma [mm]		Pole przekroju poprzecznego [mm ²]	λ
	h	b			h	b		
11	24,0	62,0	1345,6	-	24,0	62,0	1345,6	-
13	20,4	63,9	1203,2	1,12	22,6	67,9	1169,3	1,15
14	21,7	56,5	1156,8	1,04	23,3	60,0	1111,6	1,05
15	20,4	62,5	1016,4	1,14	20,6	62,5	1003,6	1,11
16	18,8	64,0	874,4	1,16	18,8	64,0	874,4	1,14

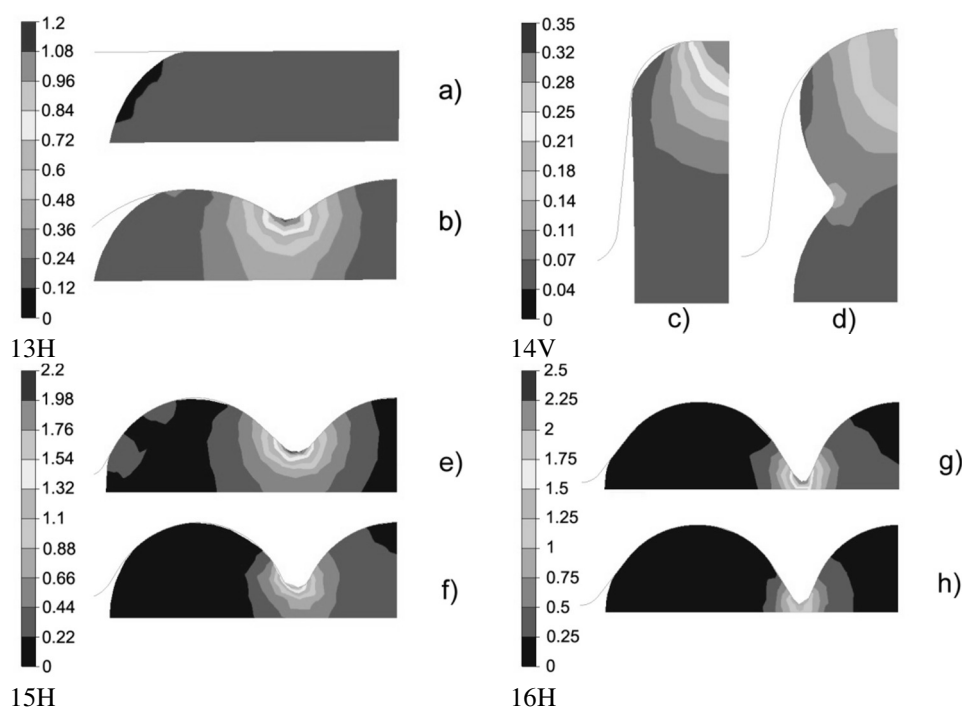
Nowe kalibrowanie walców zaprojektowano tak, aby wstępniakiem do nowego układu wykrojów było pasmo o takich samych wymiarach przekroju poprzecznego jak dla układu wykrojów stosowanych obecnie. Taką samą zasadę przyjęto dla klatki 16, po której w obu wariantach pasmo powinno charakteryzować się takim samym kształtem i wymiarami przekroju poprzecznego.

Stąd też, całkowity współczynnik wydłużenia pasma w obu układach wykrojów jest taki sam, jednakże zmianie ulegają jednostkowe współczynniki wydłużenia w poszczególnych klatkach. Wynika to ze zmiany kształtu wykrojów w poszczególnych przepustach, a tym samym ze zmianą zastosowanego schematu odkształceń.

Zmiana schematu odkształceń wynika z wprowadzenia w klatce 13, w miejsce płaskiej beczki, wykroju wstępnie rozcinającego, co spowodowało wzrost wydłużenia pasma (tabela 2), ponieważ w wykrojach metal intensywniej płynie w kierunku walcowania, w szczególności w obszarach pasma, w których tworzą się mostki łączące poszczególne żyły. W klatce 14 współczynnik wydłużenia dla obu wariantów jest praktycznie taki sam. Natomiast w wykrojach w klatce 15 i 16 zaobserwować można zmniejszenie wartości

współczynnika wydłużenia w nowym układzie wykrojów (tab. 2) w porównaniu do układu wykrojów stosowanego obecnie. Spadek ten spowodowany jest zastosowaniem w nowym układzie wykrojów pierwszego wykroju wstępnie rozcinającego już w klatce 13, dzięki czemu całkowity gniot w obszarach pasma, w których kształtowane są mostki łączące poszczególne żyły jest rozłożony na 3 przepusty. Natomiast w układzie wykrojów stosowanym obecnie wymagana wysokość mostków łączących poszczególne żyły uzyskuje się w 2 przepustach. Stąd też, konieczne jest zastosowanie większych odkształceń w porównaniu do nowego układu wykrojów rozcinających.

Zastosowanie nowego układu wykrojów rozcinających wpłynęło również na zmianę rozkładu odkształceń w tych wykrojach. Na rysunku 7 pokazano rozkłady intensywności odkształcenia dla obydwóch wariantów walcowania.



Rys. 7. Rozkład intensywności odkształcenia na przekroju poprzecznym pasma w płaszczyźnie wyjścia z kotliny walcowniczej;: a,c,e,g) układ wykrojów stosowany obecnie, b,d,f,h) nowy układu wykrojów, (1/4 pasma)

Otrzymany rozkład intensywności odkształcenia na przekroju poprzecznym pasma walcowanego w nowym wykroju wstępnie rozcinającym (rys. 7b) różni się od rozkładu intensywności odkształcenia w paśmie walcowanym na gładkiej beczce (rys. 7a). Na całym przekroju poprzecznym pasma walcowanego na gładkiej beczce, w płaszczyźnie jego wyjścia z kotliny walcowania, otrzymano równomierny rozkład intensywności odkształcenia. Natomiast w paśmie walcowanym w nowym wykroju wstępnie rozcinającym wystąpił lokalny wzrost wartości intensywności odkształcenia w obszarach pasma będących pod bezpośrednim oddziaływaniem części nożowych bruzdy walca. Analizując rozkład intensywności odkształcenia na przekroju poprzecznym pasma

walcowanego w klasycznym wykroju osadczym (układ wykrojów stosowany obecnie, klatka 14) można stwierdzić, że pasmo jest odkształcane bardziej w części płaskiej dna bruzdy wykroju (rys. 7c) a środkowa część pasma nie jest odkształcana. Zastosowanie zaokrąglenia dna bruzdy wykroju osadczego (rys. 7d) spowodowało, że otrzymane wartości intensywności odkształcenia są mniejsze i bardziej równomiernie rozłożone na przekroju poprzecznym pasma, w porównaniu do rozkładu otrzymanego dla wykroju osadczego stosowanego obecnie (rys. 7c). Lokalny, nieznaczny wzrost wartości odkształceń wystąpił w obszarach pasma ukształtowanego przez części nożowe bruzdy wykroju walca w klatce 13 (rys. 7d). Charakter rozkładu intensywności odkształcenia przedstawiony na rys. 7f jest podobny do rozkładu odkształceń otrzymanych podczas walcowania pasma w pierwszym wykroju wstępnie rozcinającym (rys. 7b). W wyniku zwiększenia ilości wykrojów rozcinających (nowy układ wykrojów) w analizowanym przepuście (klatka 15) możliwe było zmniejszenie wysokości wstępnie ukształtowanych mostków, łączących poszczególne żyły pasma (rys. 7f) w stosunku do wykroju dotychczas stosowanego (rys. 7e). Przy dalszej redukcji wysokości mostków uzyskano rozkład intensywności odkształcenia o podobnym charakterze do rozkładów we wcześniejszych przepustach, jednakże wartości otrzymanych odkształceń w tych obszarach pasma są znacznie mniejsze (rys. 7h), w porównaniu do wartości otrzymanych przy zastosowaniu układu wykrojów rozcinających stosowanych obecnie (2 wykroje rozcinające), rys. 7g. Dla pozostałych obszarów pasma otrzymane wartości odkształcenia dla obu wariantów były zbliżone. W obu wariantach największe wartości intensywności odkształcenia występują w mostkach łączących poszczególne żyły pasma.

Zaprojektowany układ wykrojów rozcinających wpłynął na zmianę wartości intensywności odkształcenia podczas walcowania pasma w poszczególnych przepustach grupy klatek wykańczających (klatki 13÷16). Nowy kształt wykrojów zapewnił uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu odkształcenia na przekroju poprzecznym pasma, co wpłynęło na mniejsze zużycie się wykrojów podczas procesu walcowania (w szczególności wykroju w klatce 16).

5. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji numerycznych stwierdzono, że zarówno podczas trójżyłowego walcowania pretów żebrowanych w układzie wykrojów stosowanym obecnie jak i nowym układzie wykrojów uzyskano prawidłowe wypełnienie poszczególnych wykrojów. Pozwala to stwierdzić, że kalibrowanie walców zostało opracowane poprawnie. Nowe kalibrowanie walców wpłynęło na zmianę schematu odkształceń w klatkach 13÷16 co wynikało ze zmiany kształtu wykrojów w poszczególnych przepustach.

Zaproponowany układ wykrojów rozcinających umożliwia stosowanie mniejszych odkształceń metalu w poszczególnych przepustach, dzięki czemu znacznie zmniejszyło się zużycie wykrojów rozcinających, w stosunku do obecnie stosowanego układu wykrojów – z dwoma wykrojami rozcinającymi. Wpłynie to na wydłużenie czasu użytkowania walców w wykańczającej grupie klatek bez konieczności ich przetaczania.

Literatura:

1. Danchenko V., Dyja H., Lesik L., Mashkin L., Milenin A.: Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach. Metalurgia nr 28. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2002.
2. Mróz S.: Proces walcowania prętów z wzdłużnym rozdzielaniem pasma. Seria Monografie Nr 138. 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, 620-622.
4. Lambiase F.: Prediction of geometrical profile in slit rolling pass. Int. J. Adv. Manuf. Techno., 71, 2014, 1285–1293.
5. Turczyn S., Michałowski M.: Walcowanie prętów okrągłych z wielokrotnym podziałem wzdłużnym pasma „multi slit rolling”. Hutnik – Wiadomości Hutnicze, 1, 1999, 8-12.
6. Mróz S., Szota P., Dyja H.: Analysis of Slitting Passes Wear for Rolling Ribbed Bars with a Longitudinal Band Separation. Steel Research International, Special Edition. Proceedings of the 14th International Conference on Metal Forming, 2012, 111-114.
7. Mróz S.: Modification of the roll pass design to the bar rolling process with longitudinal band separation. Archives of Metallurgy and Materials, 54, 2009, 597-605.
8. Strycharska D., Mróz S., Szota P.: Wpływ układu wykrojów rozcinających na ich zużycie podczas walcowania prętów, Mechanik, 1, 2017, 78-79.
9. Szota P., Strycharska D., Mróz S., Stefanik A.: Analysis of rolls wear during the ribbed bars multi-slit rolling process, Archives of Metallurgy and Materials, 60 (2), 2015, 815-820.
10. FORGE3® Reference Guide Release 6.2, Sophia-Antipolis, November 2002.
11. PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu. PKN Warszawa 2010.
12. PN-ISO 6935-2 - Stal do zbrojenia betonu - Pręty żebrowane.
13. PN-ISO 6935-2/AK - Stal do zbrojenia betonu - Pręty żebrowane - Dodatkowe wymagania stosowane w kraju.

Dr inż. Dominika STRYCHARSKA,
Dr inż. Marzena OGÓREK
Katedra Zarządzania Produkcją i Logistyki
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Politechnika Częstochowska
Aleja Armii Krajowej 19
42-200 Częstochowa
e-mail: strycharska.dominika@wip.pcz.pl
ogorek.marzena@wip.pcz.pl