

Mariusz NIEKURZAK*

MODELOWANIE WPLYWU EKSPLOATACJI WALCÓW NA ICH ZUŻYCIE

MODELLING THE EFFECT OF THE USE OF ROLLERS ON THEIR WEAR

Słowa kluczowe:

walownia taśm na gorąco, zużycie walców, stal, taśma

Key words:

hot-rolling mill, waste of metallurgical rolls wear, steel, strip

Streszczenie

Istotnym elementem w prawidłowej pracy walcowni jest odpowiednie planowanie warunków eksploatacji walców, ponieważ czynnik ten stanowi element limitujący w procesie produkcji. W artykule przedstawiono zbiór wyników eksploatacyjno-badawczych, które opracowano na podstawie zaawansowanych programów szlifierek w określonym okresie eksploatacji w walcowni gorącej taśm. Prezentowane opracowanie opisuje głównie wpływ trwania czasu kampanii walcowniczej na wielkość przetoczenia i efektywność pracy walców w poszczególnych klatkach zespołu wykańczającego, będącą miarą trwałości wykorzystania walca.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania ul. Gramatyka 10, 30-067 Kraków, e-mail: mariusz_niekurzak@interia.pl, tel. (12) 617 39-90.

WPROWADZENIE

W procesie wytwarzania taśm stalowych najbardziej odpowiedzialnym za ich jakość narzędziem są walce hutnicze. Należą one do najdroższych narzędzi stosowanych w plastycznej przeróbce metali. Ze względu na wymaganą jakość walcowanych taśm zasadnicze znaczenie ma stan walców zespołu wykańczającego, gdyż one w największym stopniu wpływają na dokładność wymiarów i jakość taśm. Podczas produkcji taśmy stalowej istotnym problemem jest wysoki stopień zużycia walców, szczególnie roboczych i przez to konieczność częstej ich przebudowy. W przypadku walców roboczych całego zespołu wykańczającego wymiana odbywa się co 8–10 godzin, a walców oporowych co 2–3 tygodnie, w zależności od ilości i asortymentu walcowanych taśm. Ciągłe udoskonalanie tego narzędzia pozwala na uzyskiwanie coraz wyższej wydajności oraz zapewnia uzyskiwanie taśm o wyższej jakości powierzchni i dokładniejszych wymiarach geometrycznych.

CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA ZUŻYCIE WALCÓW

Walce są podstawowym narzędziem walcarek, gdyż bezpośrednio formują pasmo metalu, nadając mu kolejne kształty aż do osiągnięcia wyrobu gotowego o odpowiednio dokładnych wymiarach i zadowalającej powierzchni. Zużycie walców jest jednym z najważniejszych zagadnień ekonomiki procesu walcowania i uznane jest jako jedno z podstawowych materiałowych kryteriów, ilości walcowanego materiału powodującego konieczność wymiany walców. Na zużycie walców wpływają: temperatura walcowania, zastosowane w zależności od programu walcowania wielkości gniotów, skład chemiczny walców oraz naturalne zjawiska fizyczne występujące w procesie walcowania. Z tego powodu przyjmuje się, że naczelnym zadaniem staje się możliwie największe przedłużenie żywotności walca, nawet gdyby miało się to odbywać kosztem mniejszej dokładności walcowanego pasma [L. 1].

Wyroby walcowane, aby były uznane za dobrej jakości, muszą mieć wymiary mieszczące się w ściśle określonych tolerancjach podanych w odpowiednich normach lub uzgodnieniach oraz spełniać wymagania odnośnie do jakości powierzchni i właściwości technologicznych. Czynniki te wpływają decydująco na określenie momentu, w którym walce tracą możliwość dawania poprawnego pod względem dokładności i jakości powierzchni wyrobu. Określają więc one bezpośrednio dopuszczalną wielkość zużywania się powierzchni beczki walca. W miarę wzrostu ilości walcowanych taśm stalowych ulega pogorszeniu stan powierzchni beczki walca, który w pierwszej kolejności objawia się utratą wymaganej gładkości powierzchni i przez to walcowanych wyrobów, a następnie różnicowaniem grubości pasma na jego przekroju [L. 2]. Zużycie powierzchni roboczej beczki walca podczas walcowania wynika ze zjawisk fizycznych pro-

cesu walcowania, które uwidaczniają się przez oddziaływanie trzech zasadniczych mechanizmów:

- 1) ścieranie się powierzchni beczki wskutek tarcia z odkształcanym gorącym pasmem metalu przemieszczającego się względem jego powierzchni,
- 2) zmęczenie mechaniczne warstwy powierzchniowej walca na skutek działania cyklicznych zmian naprężeń mechanicznych wywołanych przez walcowany materiał,
- 3) zmęczenie cieplne warstwy powierzchniowej spowodowane cyklicznymi lokalnymi zmianami temperatury powodującymi powstawanie naprężeń między miejscami o różnych temperaturach.

W czasie walcowania na walce działają obciążenia okresowo zmienne. Przy dużych prędkościach działanie sił można traktować jako dynamiczne uderzenia w bezwładną masę. Przy zbyt dużych naprężeniach przekraczających granicę wytrzymałości materiału walec ulega złamaniu w miejscu działania siły [L. 3]. Uszkodzenia powierzchni beczki walca są najczęściej przyczyną wpływającą na zmniejszenie trwałości walców. Na tribologię powierzchni walców wpływa również zwiększony poślizg i jednostkowe naciski metalu na walec a także zmniejszanie dokładności oczyszczania pasma ze zgorzeliny. Czynniki te powodują, że w miarę przebiegu procesu od pierwszej do ostatniej klatki zmienia się ilość walcowanego metalu będąca przyczyną zużycia walców. Z powodu nierównomiernego zużywania się walców i pogarszania stanu ich powierzchni, walce należy co pewien czas wymieniać i poddawać szlifowaniu w celu nadania odpowiedniego kształtu i usunięcia skutków zużycia.

Przy wyjaśnianiu mechanizmów zużycia walców w celu określenia wpływu oddziaływania poszczególnych mechanizmów należy rozpatrywać wpływ czynników, odnosząc je zawsze do działania określonej, jednakowej ilości materiału.

METODYKA BADAŃ

Zakres opracowanych danych dotyczył zużycia walców w poszczególnych klatkach zespołu wykańczającego, oznaczonych F1-F6 w latach 2011–2012. W analizowanym okresie eksploatowano walce wykonane ze stali: szybko tnącej – *HSS (High Speed Steel)*, z żeliwa wysokochromowego – *Hi-Cr (High Chromium Cast Iron)* oraz z modyfikowanego żeliwa stopowego typu *EICDP* i *ICDP (Enhanced Chromium Cast Iron)*. Walce z wymienionych materiałów w sumie przepracowały 47 kampanii walcowniczych i przewalcowały w 2011 roku 1750 Gg, a w 2012 roku 1330 Gg taśm ze stali niestopowych i stopowych ogólnego przeznaczenia w następujących gatunkach: S235JR, S355JR, F1, F2, F2B, DD11, UG i UT.

Dane do analizy zostały zebrane w oparciu o karty walców, raporty produkcji, sprawozdania z obrotu walcami w eksploatacji z poszczególnych miesięcy i innych dokumentów. Za miarę stopnia wykorzystania walca przyjęto stosowany w hutnictwie wskaźnik *Q* określany z następującego wzoru [L. 4]:

$$Q = \frac{Z}{U} \quad (1)$$

gdzie: Z – ilość przewalcowanej stali, Mg,

U – zmniejszenie masy walca w wyniku przetoczenia i kalibrowań, kg.

Całkowite zużycie walców, zwane naturalnym, jest sumą zużycia materiału walca wyrażone w kg wskutek przymusowego przetaczania w ciągu całego okresu pracy walca, tzn. od pierwszego złożenia do wycofania na złom. Zebranie i analiza danych na temat zużycia walców dostarcza każdej walcowni bardzo cennych informacji, dzięki którym można określić czasy przebudów walców. Usprawnia to znacznie proces planowania produkcji całego ciągu technologicznego oraz przyczynia się do obniżenia kosztów eksploatacji.

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Na podstawie zautomatyzowanych procesów szlifowania, których szlifierki zapisują rzeczywiste pomiary z dokładnością do 0,001 mm, w (**Tab. 1**) zestawiono poziom zużycia walców za 2011 i 2012 rok.

Tabela 1. Wskaźniki zużycia walców za lata 2011 i 2012

Table 1. Index waste of roller for 2011 and 2012

Typ walca		Materiał	Zużycie za rok	
			2011	2012
Walce klatek zespołu wstępnego				
Walce oporowe	∅ 1600x2500	Stal 3% Cr	0,06	0,04
	∅ 1600x2500	Stal 3% Cr	0,353	0,361
∑ dla walców oporowych			0,413	0,401
Walce robocze	∅ 1100	ICDP	0,105	0,157
	∅ 1250x 2500	EICDP	0,353	0,361
∑ dla walców roboczych			0,458	0,518
Walce klatek zespołu wykańczającego				
Klatka F1-F3	∅ 825x2500	ICDP	0,557	0,538
Klatka F1-F3	∅ 825x2500	ICDP	0,463	0,473
Klatka F4	∅ 825x2500	EICDP	0,152	0,191
Klatka F4	∅ 825x2500	ICDP	1,056	1,092
Klatka F5 i F6	∅ 730x2500	Hi-Cr	1,982	1,961
Klatka F5 i F6	∅ 730x2500	Hi-Cr	2,011	2,197
∑ dla walców roboczych i oporowych			6,221	6,452
∑ dla walców roboczych i oporowych całego zespołu walcowniczego			7,092	7,371

Źródło: opracowanie własne.

Analizując wyznaczone w czasie badań wskaźniki, można zaobserwować, że największe zużycie wykazują walce wykonane z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr zabudowane w klatkach F5 i F6 zespołu wykańczającego. Ich zużycie zarówno w 2011 i 2012 roku przekraczało dopuszczalne graniczne tolerancje ustalone w normach podanych przez producenta tego typu walca. W konsekwencji prowadziło to do zmniejszenia wydajności procesu walcowania oraz wzrostu kosztów produkcji.

W celu obniżenia kosztów produkcji walcowni, zmniejszenia ilości koniecznych przebudów walców oraz optymalnego wykorzystania ich powierzchni roboczej przeprowadzono symulację komputerową, wykorzystując „System zarządzania szlifiernią walców”. Celem symulacji było określenie efektów zastąpienia walców roboczych wykonanych z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr, obecnie pracujących w klatkach F5 i F6 zespołu wykańczającego, walcami wykonanymi z nowej generacji stali szybko tnącej HSS, odznaczającymi się wyższymi właściwościami mechanicznymi oraz technologicznymi. Wyniki tych badań przedstawiono w pracy [L. 5].

Walce wykonane z tej stali zastępują w coraz większym stopniu walce żeliwne o nieokreślonej warstwie utwardzania oraz są kontynuacją rozwoju żeliwnych walców wysokochromowych. Zmiana w ich strukturze polega na zastąpieniu części chromu innymi pierwiastkami węglotwórczymi, takimi jak: wolfram, tytan, niob i wanad, mającymi na celu podniesienie właściwości mechanicznych oraz technologicznych stali. Na próbkach do badań z laboratoryjnego wlewka wykonano szereg zabiegów obróbki cieplnej [L. 5]. Rodzaje wykonanej obróbki cieplnej oraz uzyskane w ich wyniku twardości podano w **Tab. 2**.

Tabela 2. Wyniki pomiarów twardości próbki ze stali szybko tnącej HSS [L. 5]

Table 2. The results of measurements hardness sample from steel of type the HSS [L. 5]

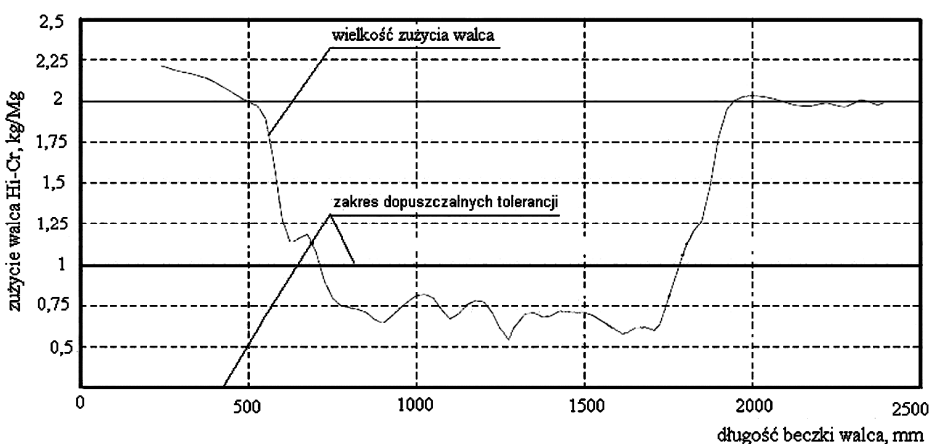
Rodzaj obróbki cieplnej	Twardość		
	HB	HRC	HSh
Stan po odlaniu	598–629	61	83–84
Zmiękczoney 700°C/8 h	278–289	–	56–59
Hartowany 1050–1080°C	–	62–64	78–81
Odpuszczony jednokrotnie 580–600°C/3 h	–	59–61	71–74
Odpuszczony dwukrotnie 580–600°C 3 h	–	51–53	72–76

Na jakość walców decydujący wpływ ma udział objętościowy i cechy morfologiczne fazy węglkowej. Optymalnym rozwiązaniem na potrzeby analizowanych badań okazał się siatkowy układ węglików uzyskiwany w wyniku zastosowania wyżarzania normalizującego niezupełnego. Samoregeneracja war-

stwy wierzchniej walców o takiej mikrostrukturze, dzięki łatwemu usuwaniu z powierzchni walca tzw. białej warstwy [L. 6], praktycznie zapobiega tworzeniu się siatki mikropełnięć i wykruszeń, a jego twardość mierzona ilością Mg odwalcowanego wyrobu zależy od parametrów stereologicznych fazy węglkowej i własności osnowy. Jeżeli skład chemiczny materiału walca, o węglkach w formie siatki optymalnej z punktu widzenia tribologicznego, umożliwi zmianę twardości jego osnowy, możliwym staje się wytworzenie dobrych, wydajnych walców zarówno dla walcowni zimnej; jak i gorącej blach i taśm stalowych.

MODELOWANIE WPŁYWU EKSPLOATACJI WALCÓW NA ICH ZUŻYCIE

W przeprowadzonej symulacji porównano zużycie walców wykonanych z dwóch typów materiału: stali szybko tnącej HSS oraz z żeliwa Hi-Cr, pracujących w tych samych warunkach, tzn. identycznych parametrach walcowania. Program „System Zarządzania Szlifiernią Walców” jest połączony ze szlifiernią walców wyposażoną w moduł sterowania numerycznego (CNC), obróbką zgrubną i wykańczającą walców w celu nadania im żądanego profilu w wąskim zakresie tolerancji oraz pozwalającego określić za pomocą metody prądów wirujących ich defekty. Po wprowadzeniu wszystkich parametrów walca i porównaniu ich z zakresem rzeczywistych tolerancji badana krzywa pracy walca w procesie walcowania wychodzi poza zakres ustalonej dopuszczalnej tolerancji wyznaczonej dla optymalnej jego pracy, co przedstawiono na **Rysunku 1**.



Rys. 1. Wykres wielkości miejscowego zużycia dla walców z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr

Fig.1. The graph volume of local consumption for rolling of type the Hi-Cr

Źródło: opracowanie własne.

Oznacza to, że walec z żeliwa typu Hi-Cr po przewalcowaniu 1 kampanii walcowniczej taśm (2000 Mg) posiada wyraźne wady, które wpływają na jego zużycie. Wady te można określić w oparciu o mapy usterek, które implikuje program, wykorzystując wykresy błędu wygenerowanego na podstawie porównanego z otrzymanym profilem modelu teoretycznego. W oparciu o mapy usterek można określić typy wad walca, m.in.: pęknięcia i bicia, które są wynikiem jego zużycia w procesie eksploatacyjnym (**Tab. 3**).

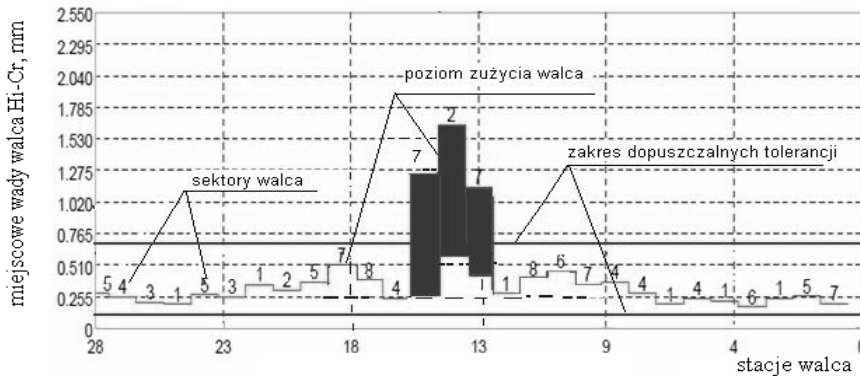
Tabela 3. Mapa wad walca z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr

Table 3. The map of defects for rolling of type the Hi-Cr

Sektory walca	Stacje walca z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr, mm						
	14	13	12	11	10	9	8
8	0,29	0,14	0,18	0,17	0,25	0,19	0,15
7	0,60	0,13	0,21	0,22	0,27	0,16	0,14
6	0,22	0,11	0,16	0,27	0,23	0,22	0,13
5	0,18	0,21	0,11	0,18	0,20	0,17	0,12
4	0,14	0,14	0,12	0,15	0,16	0,21	0,15
3	0,13	0,14	0,13	0,18	0,28	0,19	0,14
2	0,40	0,19	0,12	0,18	0,22	0,20	0,13
1	0,24	0,13	0,17	0,17	0,22	0,19	0,14
8	0,35	0,15	0,40	0,32	0,35	0,31	0,24
7	1,14	0,26	0,21	0,37	0,35	0,31	0,22
6	0,21	0,17	0,27	0,46	0,32	0,30	0,20
5	0,31	0,23	0,16	0,26	0,23	0,28	0,20
4	0,21	0,21	0,23	0,27	0,29	0,37	0,28
3	0,17	0,19	0,31	0,23	0,32	0,29	0,24
2	0,56	0,22	0,33	0,22	0,35	0,26	0,22
1	0,52	0,28	0,23	0,42	0,29	0,29	0,16
Sektory walca	Stacje walca z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr, mm						
	21	20	19	18	17	16	15
8	0,11	0,17	0,22	0,20	0,16	0,43	0,13
7	0,09	0,19	0,25	0,25	0,14	0,27	0,23
6	0,13	0,17	0,23	0,17	0,16	0,16	0,48
5	0,13	0,19	0,20	0,14	0,15	0,14	0,11
4	0,16	0,18	0,21	0,17	0,16	0,15	0,13
3	0,13	0,16	0,21	0,16	0,12	0,16	0,29
2	0,13	0,21	0,23	0,19	0,16	0,21	0,52
1	0,11	0,24	0,21	0,18	0,18	0,16	0,14
8	0,19	0,28	0,41	0,39	0,24	0,62	0,35
7	0,15	0,36	0,51	0,36	0,18	0,72	0,97
6	0,20	0,37	0,35	0,20	0,16	0,17	1,08
5	0,25	0,36	0,37	0,22	0,22	0,20	0,23
4	0,31	0,29	0,42	0,24	0,24	0,16	0,29
3	0,23	0,27	0,30	0,31	0,17	0,25	1,05
2	0,31	0,27	0,26	0,22	0,24	0,72	1,64
1	0,21	0,26	0,40	0,28	0,22	0,25	0,38

Źródło: opracowanie własne.

Dla wykonania dokładniejszej analizy powierzchnię walca umownie podzielono na sektory wzdłuż jego promienia i stacje na jego długości. Poziom określonego zużycia walca jest wskazywany dla każdej oddzielnej komórki sektora i stacji określonego walca. Pogrubionymi cyframi oznaczono powstałe wady materiałowe. Diagram przedstawiony na **Rys. 2** wskazuje, że walec tego typu nie zużywa się optymalnie, a więc równomiernie na całej swej powierzchni.

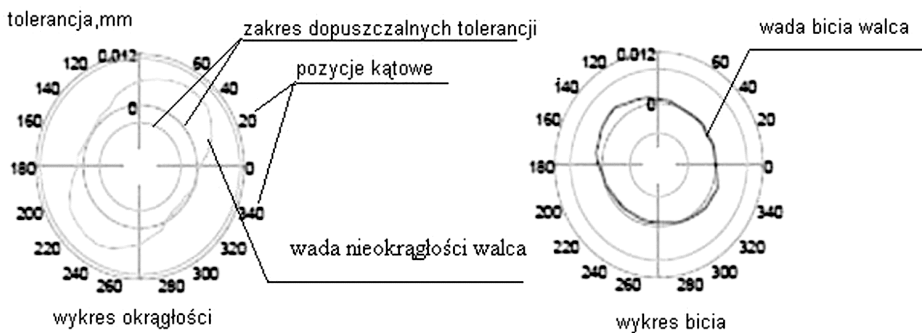


Rys. 2. Wykres poziomu wad wygenerowany na podstawie mapy usterek dla walca z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr

Fig. 2. The graph level defects generated on basis of faults map of type the Hi-Cr

Źródło: opracowanie własne.

Z kolei wykres biegunowy, pokazany na **Rys. 3**, dostarcza niezbędnych informacji związanych z wadami ukrytymi, występującymi pod powierzchnią roboczą beczki walca oraz wadami w postaci nieokrągłości, wykazany dla różnych pozycji kątowych.



Rys. 3. Wykres nieokrągłości i bicia walców żeliwa wysokochromowego Hi-Cr

Fig. 3. The graph roundness and beating for rolling of type the Hi-Cr

Źródło: opracowanie własne.

Jeżeli zmierzy się zmiany wysokości wierzchołków (E, Q) w odniesieniu do pozycji zero, otrzyma się wartość okrągłości $K(\alpha)$, czyli kluczowe informacje o technicznym stanie badanego walca:

$$K(\alpha) = \frac{E(\alpha) + Q(\alpha)}{2} \quad (2)$$

gdzie: $K(\alpha)$ – okrągłość walca,

$E(\alpha)$ – wysokość górnego wierzchołka walca,

$Q(\alpha)$ – wysokość dolnego wierzchołka walca.

Jeżeli obliczona na podstawie wzoru suma wysokości wierzchołków daje okrąg, oznacza to, że przekrój walca jest doskonale okrągły i nie powoduje białych wpływających na jego przyspieszone zużycie tribologiczne. Jeżeli natomiast obliczona suma wysokości wierzchołków daje elipsę, oznacza to, że przekrój walca nie jest okrągły i wykazuje wadę w postaci bicia, która skutkuje rozprze-strzenianiem się pęknięć prowadzących w konsekwencji do jego przedwczesnego zużycia.

Analizując wykres dla walca z modyfikowanego żeliwa stopowego Hi-Cr przedstawiony na **Rys. 3** i wykorzystując zasadę superpozycji skutków, w której brano pod uwagę zarówno błędy okrągłości wywołane przez czopy i kły walca, określono, że w rzeczywistości ma się tu do czynienia z kształtem eliptrycznym, a więc walec ma wyraźne bicia wychodzące poza dopuszczalny zakres ustalonej tolerancji, co zauważalne jest głównie w klatkach F5 i F6 zespołu wykańczającego. Walce te często trzeba przebudowywać, w tym wymieniać na nowe, co zwiększa koszty produkcji oraz dezorganizuje cały system planowania pracy wydziału walcowni.

WNIOSKI

Na podstawie wykonanej analizy zużycia walców w analizowanej walcowni taśm stalowych na gorąco można wysunąć następujące wnioski:

1. W czasach dominującej na rynku konkurencji oraz ciągłego dążenia przedsiębiorstw do obniżenia kosztów produkcji, stosowanie komputerowych technik modelowania i symulacji jest jedną z metod przyczyniających się do znacznie szybszego projektowania i usprawniania istniejących systemów wytwórczych.
2. Symulacja przeprowadzona przy użyciu programu: „System Zarządzania Szlifiernią Walców” wskazuje możliwość zastąpienia w klatkach F5 i F6 walców roboczych z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr walcami ze stali szybko tnącej HSS, co przyczyni się do zwiększenia twardości walców, redukcji kosztów produkcji oraz zmniejszenia ilości ich przebudów.

3. Trwałość eksploatacyjna walców ze stali szybko tnącej HSS wynosi 14 000÷20 000 Mg przewalcowanego materiału na 1 milimetr zużycia jego powierzchni w kierunku promieniowym, w porównaniu z 2000 Mg dla walców wykonanych z żeliwa wysokochromowego Hi-Cr.
4. Walce typu HSS wykazują o 80% mniejsze zużycie w porównaniu z wałcami wysokochromowymi. Na polepszenie trwałości walca, zwłaszcza jego twardości, odporności na zużycie i odpowiedniej chropowatości powierzchni, wpłynął właściwy dobór materiału a w głównej mierze wzrost udziału węglików oraz odpowiednia struktura materiału.

LITERATURA

1. Zasadzień M., Mazurkiewicz J., Szala J.: Eksploatacja a zużycie walców, Hutnik – Wiadomości hutnicze, 2004, nr 12, s. 608-609.
2. Turczyn S.: Inżynieria wytwarzania płaskich wyrobów walcowanych na gorąco, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2008.
3. Kubiński W., Kubińska-Kaleta E., Niekurzak M.: Nowoczesna walcownia taśm stalowych walcowanych na gorąco oraz współczesne kierunki rozwoju procesów ich wytwarzania, Hutnik – Wiadomości hutnicze 2010, nr 7, s. 333–338.
4. Niekurzak M.: Zastosowanie metod symulacji do skrócenia cyklu walcowania taśm stalowych z wykorzystaniem modelu zużycia walców, Praca doktorska, AGH, Kraków 2011.
5. Zdonek B., Tokarz A., Mączyński J.: Charakterystyka walców ze stali szybko tnącej (typu HSS), Hutnik – Wiadomości Hutnicze, 2002, nr 2, s. 44–50.
6. Krawczyk J.: Zjawiska tribologiczne zachodzące na powierzchni czopów żeliwnych walców hutniczych, Tribologia 219, 3 (2008) 17–26.

Summary

An important factor in the proper operation of a mill is the appropriate planning conditions of exploitation rollers, because this factor is the limiting element in the production process. The article presents a set of operational and research results, which are based on advanced programs concerning grinders in a certain period of operation in a hot strip mill. The presented paper mainly describes the impact of the mill on the length of the operation, the amount of transfusion, and the efficiency of the cylinder, which is a measure of the sustainability of the use of the cylinder.