



Polerowanie elektrochemiczne wybranego elementu maszyny papierniczej

Electrochemical polishing of the selected item of the paper machine

STANISŁAW ZABORSKI
ADAM SUDZIK
MAREK KOŁODZIEJ*

Wszystkie elementy maszyny papierniczej stykające się z papierem wymagają wysokiej precyzji wykonania, zarówno pod względem dokładności wymiarowo-kształtowej, jak i stanu warstwy wierzchniej. Kluczowym elementem maszyny papierniczej jest wlew, który odpowiada za uformowanie masy celulozowej we wstęgę papieru. Powierzchniom wlewu stykającym się z masą papierniczą stawiane są bardzo wysokie wymagania. Płyta boczna wlewu będzie poddana polerowaniu elektrochemicznemu. W referacie zaprezentowany zostanie sposób polerowania elektrochemicznego, stanowisko do polerowania oraz elektrolity.

SŁOWA KLUCZOWE: Polerowanie elektrochemiczne, stal kwasoodporna, elektrolity.

All the elements of the machine in contact with the paper require high precision, both in terms of net shape and condition of the surface layer. The key element is the headbox of a paper machine, which is responsible for forming the pulp into a web of paper. Headbox surfaces in contact with the paper pulp are placed very high demands. Side plate filler is subjected to electrochemical polishing. The paper will be presented a way of electrochemical polishing, polishing position and electrolytes.

KEYWORDS: Electrochemical polishing, stainless steel, electrolytes.

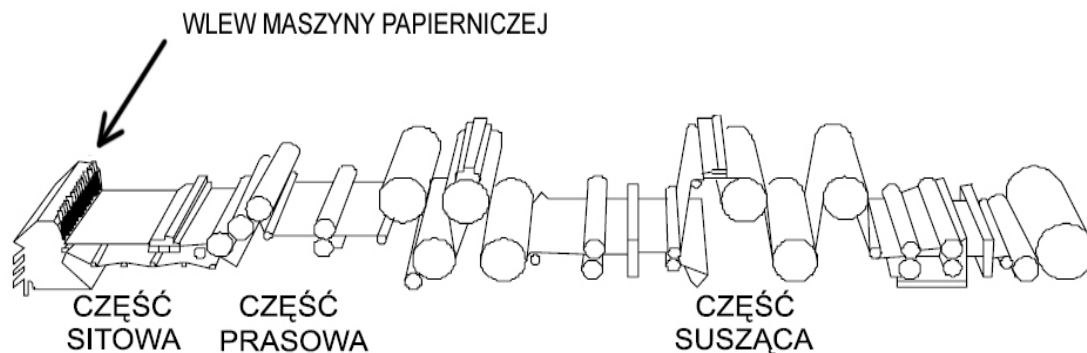
Produkcja papieru towarzyszy od stuleci rozwojowi cywilizacji. Początkowo był on towarem bardzo cennym, dostępnym jedynie nielicznym. Wraz z rozwojem technologii drukarskich i upowszechnieniem umiejętności czytania

i pisania papier zaczął być używany bardziej powszechnie. Jego ręczna produkcja przestała być wystarczająca, więc jak większość metod wytwórczych została zmechanizowana. Maszyny papiernicze używane obecnie są jednymi z największych urządzeń stosowanych w przemyśle. Stanowią one całe ciągi technologiczne w których z uprzednio przygotowanej masy celulozowej powstaje gotowy papier. Niektóre z maszyn papierniczych osiągają do 500 m długości i kilkunastu metrów wysokości [3,4]. Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat maszyny papierniczej.

Elementy maszyny stykające się z masą celulozową oraz z gotową wstęgą papieru wykonywane są głównie ze stali kwasoodpornej. Podyktowane to jest składem masy celulozowej, której odczyn nie jest obojętny. Wszystkie elementy maszyny stykające się z papierem wymagają wysokiej precyzji wykonania, zarówno pod względem dokładności wymiarowo-kształtowej, jak i stanu warstwy wierzchniej. Wykonywanie poszczególnych elementów maszyn sprawia trudności technologiczne głównie ze względu na wielkość poszczególnych elementów. Przykładowa fotografia (rys.2.) pokazuje rząd wielkości niektórych elementów maszyn papierniczych [9].

Kluczowym elementem maszyny papierniczej jest wlew. Odpowiada on za uformowanie masy celulozowej we wstęgę papieru. Podawana masa składa się w 99% z wody oraz dodatków procesowych i tylko w 1% z włókien. Tak duża zawartość wody zapobiega flokulacji, czyli dążeniu włókien do łączenia się ze sobą. Gdyby flokulacja nie została wyeliminowana uzyskany finalnie papier uformowałby niejednorodną powierzchnię. Aby zapobiec flokulacji masa wylewana we wlewie prawiana jest dodatkowo w ruch.

* Prof. dr hab. inż. Stanisław Zaborski stanislaw.zaborski@pwr.edu.pl
Mgr inż. Adam Sudzik adam@sudzik.com
Dr inż. Marek Kołodziej marek.kolodziej@pwr.edu.pl



Rys. 1. Uproszczony schemat maszyny papierniczej

Wlew rozprowadza ściśle określoną, równą ilość masy papierniczej w kolejnej sekcji sitowej, gdzie następuje formowanie wstęgi papieru. Powierzchniom wlewu stykającym się z masą papierniczą stawiane są bardzo wysokie wymagania, gdyż mają one bezpośredni wpływ na jakość uzyskanego papieru. Szczególnie ważne jest zachowanie odporności korozyjnej oraz zminimalizowanie wad po-



Rys. 2. Sekcja tnąca maszyny papierniczej

wierzchni powodujących zaczepianie włókien celulozowych [8].

Ściany boczne wlewu wykonane są ze stali kwasoodpornej 316L, (00H17N14M2). Do obróbki wykończeniowej ściany bocznej wlewu maszyny papierniczej zdecydowano się zastosować polerowanie elektrochemiczne, gdyż zapewnia ono uzyskanie wymaganych właściwości powierzchni i zapewnia najkrótszy czas obróbki w przypadku tak dużego elementu. Celem badań było sprawdzenie efektów polerowania elektrochemicznego i potwierdzenie zasadności jego użycia w przypadku obróbki ściany bocznej wlewu maszyny papierniczej. Na rysunku 3 przedstawiono widok ogólny wlewu maszyny papierniczej.

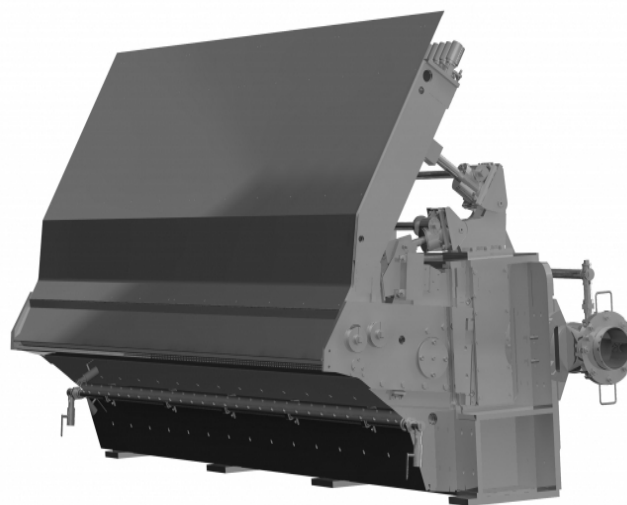
Charakterystyka polerowania elektrochemicznego

Polerowanie elektrochemiczne metali jest obróbką wykończeniową, dającą w efekcie powierzchnię o właściwościach wyróżniających się wieloma pozytywnymi cechami. Dlatego polerowanie elektrochemiczne jest stosowane, zwłaszcza do obróbki różnych elementów ze stali nierdzewnej, kwasoodpornej, stopów aluminium i stopów tytanu [10,11]. Mate-

riały te są coraz częściej stosowane w różnych działach przemysłu i należą do materiałów trudnoobrabialnych. Na wytłumaczenie zjawisk zachodzących podczas polerowania elektrochemicznego istnieje kilka teorii. Na powierzchni anody zachodzą reakcje chemiczne i elektrochemiczne i tworzy się szczelna warstwa dyfuzyjna, która stabilizuje anodową gęstość prądu. Na temat składu i budowy tej warstwy zdania są podzielone. Niektórzy badacze twierdzą, że jest to lita powłoka typu tlenkowego a inni, że jest to lepka warstwa bezwodna. Są również źródła informacyjne, które podają, że w warstwie tej można wyróżnić dwie strefy [8,11]:

- wewnętrzną pasywną o grubości kilku Å zbudowaną z tlenków metali anody,
- zewnętrzną lepka o grubości kilkudziesięciu μm , w skład której wchodzi produkty rozpuszczania metali w elektrolicie, składniki elektrolitu oraz jony metalu anody.

Warstwa pasywna stawiając duży opór jonom metalu przechodzącym z powierzchni do elektrolitu, chroni ją przed trawieniem i tym samym wyrównuje szybkość rozpuszczania się różnie zorientowanych kryształów, a także różnych składników strukturalnych. Warstewka lepka wskutek



Rys. 3. Wlew maszyny papierniczej

znacznie większej oporności niż elektrolit (jej przewodność zależy od grubości) i nierównomiernej grubości – na wierzchołkach nierówności jest cieńsza, a we wgłębieniach grubsza - powoduje to szybsze rozpuszczanie wierzchołków nierówności niż wgłębień. Nie bez wpływu na szybkość rozpuszczania metalu ma kształt powierzchni, czyli makrogeometria przedmiotu. Naroża, ostre krawędzie, wypukłości rozpuszczają się szybciej niż wgłębienia i wnęki. Przyczyną tego jest niejednorodność pola elektrycznego nad wypukłościami i wklęsłymi fragmentami powierzchni, co prowadzi do różnic w warstwach podziału potencjałów przy tych powierzchniach. To z kolei powoduje zróżnicowaną gęstość prądu i różne szybkości rozpuszczania metalu w tych obszarach. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym szybkość rozpuszczania metalu jest ruch elektrolitu, który może zmniejszać grubość warstwy lepkiej na wypukłych fragmentach powierzchni [1,2].

Należy również wspomnieć o wpływie kształtu katody na szybkość rozpuszczania anody w różnych jej obszarach. Powierzchnie bardziej oddalone od katody rozpuszczają się wolniej. Najwolniej jednak rozpuszczają się powierzchnie anody, których katoda „nie widzi”.

Proces polerowania elektrochemicznego możliwy jest dzięki elektrolizie i procesom elektrodowym zachodzącym na anodzie i katodzie zanurzonych w środowisku zdysocjowanych kwasów, zasad lub soli. Efektem tej obróbki jest otrzymanie gładkiej powierzchni z wyblyszczaniem. Proces ten nie wprowadza dodatkowych naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu. Również jego ważną zaletą jest zmniejszenie naprężeń warstwy wierzchniej powstałych na skutek poprzednich obróbek. Pewnym niebezpieczeństwem w procesie elektrochemicznego roztwarzania warstwy powierzchniowej metalu jest możliwość wydzielenia się wodoru i jego dyfuzja w głąb obrabianego przedmiotu. Znaczne nawodorowanie może doprowadzić do deformacji sieci krystalicznej i powstania mikropęknięć.

Z uwagi, że polerowanie elektrochemiczne można zautomatyzować oraz obrabiać bardzo dużo elementów równocześnie (duże wanny), dlatego jest ono znacznie bardziej ekonomiczne niż polerowanie mechaniczne. Efektywność polerowania elektrochemicznego zależy od wielu czynników. Najważniejsze z nich to: rodzaj elektrolitu, gęstość prądu elektrycznego, temperatura elektrolitu, odległość między elektrodami, prędkość przemieszczania elektrolitu, wielkość i kształt katody, czas obróbki. Niewłaściwy dobór tych czynników prowadzi do otrzymania niekorzystnych wskaźników technologicznych, np. biorąc pod uwagę czas realizacji procesu i jego temperaturę. Zwiększanie tych wartości często prowadzi do zwiększenia wskaźników chropowatości i braku połysku na obrabianej powierzchni. Ponadto może wystąpić niekorzystne zjawisko trawienia powierzchni, co zazwyczaj dyskwalifikuje polerowany wyrób.

Podstawą elektrolitów są substancje chemiczne charakteryzujące się wewnątrzcząsteczkowym wiązaniem jonowym lub kowalencyjnym. Pod wpływem rozpuszczania w rozpuszczalniku lub topienia ulegają one rozpadowi na niezależne cząstki posiadające ładunek elektryczny. Proces ten nazywany jest dysocjacją, a w jej wyniku powstają naładowane elektrycznie atomy lub cząsteczki, zwane jonami. Cząsteczki naładowane dodatnio nazywamy kationami, zaś naładowane ujemnie anionami. Jony mają właściwości chemiczne i fizyczne różne od odpowiadających im cząsteczek i atomów w stanie elektrycznie obojętnym. Elektrolitami mogą być roztwory soli, kwasów lub zasad. Typowe elektrolity używane w praktyce przemysłowej są w większości silnie kwaśnymi lub silnie alkalicznymi roztworami, często

z dodatkiem toksycznych dla środowiska związków [6,13]. Niestety często takie elektrolity dają bardzo dobre efekty technologiczne oraz pracują w łatwych do uzyskania i utrzymania warunkach. W ostatnich latach szczególnie nacisk kładzie się więc na opracowanie elektrolitów o składzie mało uciążliwym dla środowiska [12].

Dobierając skład elektrolitu należy brać pod uwagę następujące cechy, które dobry elektrolit powinien posiadać:

1. zdolność tworzenia warstwy lepkiej i pasywnej,
2. trwałość, czyli zdolność długotrwałej pracy i stałość składu elektrolitu,
3. brak niszczącego działania na obrabiany przedmiot przy wyłączonym prądzie,
4. otrzymywanie powierzchni o wymaganej jakości przy zmianach parametrów procesu w szerokim zakresie,
5. odpowiednia głębokość procesu, istotna przy obróbkach przedmiotów o skomplikowanym kształcie,
6. bezpieczeństwo dla obsługi i środowiska.

Tabela 1. Zestawienie składów elektrolitów do elektropolerowania stali.

Nr	H ₂ SO ₄ % obj.	H ₃ PO ₄ % obj.	Inne	Temp.	Napięcie, gęstość prądu
1	30%	65%	gliceryna 5%	57°C	4,5 V, 3A/dm ²
2	37%	65%	3% trietyloamina	45°C	5V, 3,5A/dm ²
3	16-40%	44-67%	-----	45-65°C	10-50A/dm ²
4	15%	75%	CrO ₃ -0,2%, H ₂ O-reszta	50°C	12V 15-16A/dm ²

Skład elektrolitu dobierany jest w zależności od rodzaju metalu poddawanego obróbce. Przykładowe składki elektrolitów używanych w procesie polerowania elektrochemicznego stali zestawiono w tabeli 1 [5,6,7].

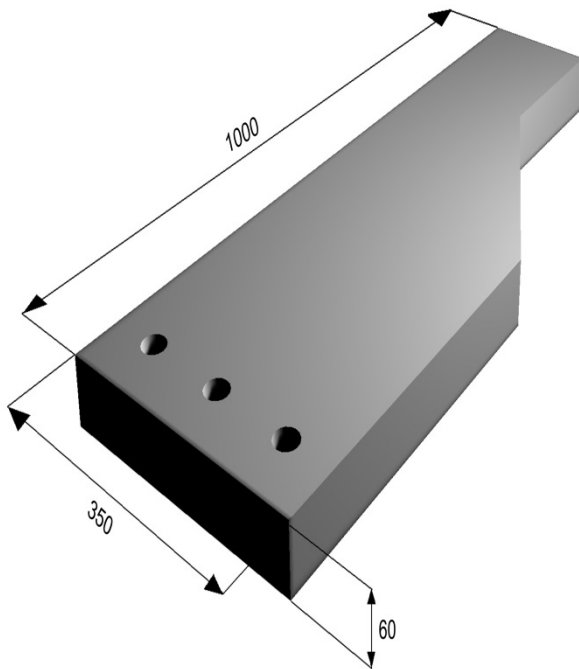
Badania doświadczalne

W trakcie badań przeprowadzono polerowanie elektrochemiczne ściany bocznej wlewu maszyny papierniczej. Jej wygląd oraz gabaryty przedstawia rysunek 4. Przedmiot został wykonany ze stali kwasoodpornej 316L (00H17N14M2) poprzez wycinanie plazmowe z płyty, następnie poddany frezarskiej obróbce kształtującej powierzchnie boczne i czołowe. Otwory wykonano poprzez wiercenie a następnie gwintowanie. Przed polerowaniem płaszczyzny poddano szlifowaniu. Szlifowanie przeprowadzone zostało na szlifierce do płaszczyzn. Zastosowano ściencię elektrokorundową o ziarnistości P320. Prędkość obwodowa ściernicy wynosiła 30 m/s, posuw 0,5 m/s. W wyniku szlifowania otrzymano powierzchnię o chropowatości Ra=0,329µm. Tak przygotowany przedmiot został wypolerowany elektrochemicznie.

Polerowanie elektrochemiczne ściany bocznej wlewu zostało przeprowadzone na stanowisku widocznym na rys. 5. Zastosowane zostały katody umieszczone po obu stronach przedmiotu polerowanego, jak na schemacie na rys. 6. Ta-

kie ich rozmieszczenie korzystnie wpływa na równomierność obróbki obu powierzchni.

Do przeprowadzenia polerowania użyty został elektrolit nr.1 którego skład przedstawiono w tabeli 1. Pewną niedogodnością podczas polerowania dużych przedmiotów jest konieczność zapewnienia odpowiednich parametrów prądowych. W tym wypadku dla uzyskania wymaganych gęstości prądu należało zastosować zasilacz 300 A. Zbyt mała



Rys. 4. Widok izometryczny ściany bocznej wlewu maszyny papierniczej

gęstość prądu powoduje brak wyblyszczania przedmiotu i gorsze wynikowe parametry chropowatości.

Przy natężeniach prądu tego rzędu zachodzi dość intensywne grzanie elektrolitu. Należy wziąć to pod uwagę, gdyż zarówno poniżej temperatury pracy, jak i powyżej niej elektrolit ma działanie odmienne od zakładanego. Zazwyczaj w niższych temperaturach nie następuje wyblyszczanie, a w zbyt wysokich może wystąpić intensywne trawienie, silne zaokrąglanie krawędzi a nawet roztwarzanie powodujące głębokie wżery na powierzchni polerowanej. Zwykle przedział temperatury jest cechą charakterystyczną dla danego elektrolitu i wskazane jest ustalenie bezpiecznego zakresu eksperymentalnie. Przy obróbce dużych przedmiotów lub przy ciągłej pracy przy przedmiotach małych i średnich konieczne należy przewidzieć możliwość stabilizacji temperatury elektrolitu, zarówno grzania jak i chłodzenia. Przy obróbce badanego elementu wystarczające okazało się podgrzanie wstępne elektrolitu oraz przeprowadzenie polerowania w wannie o wystarczająco dużej objętości, a co za tym idzie pojemności cieplnej wystarczającej do utrzymania temperatury w dopuszczalnych granicach.

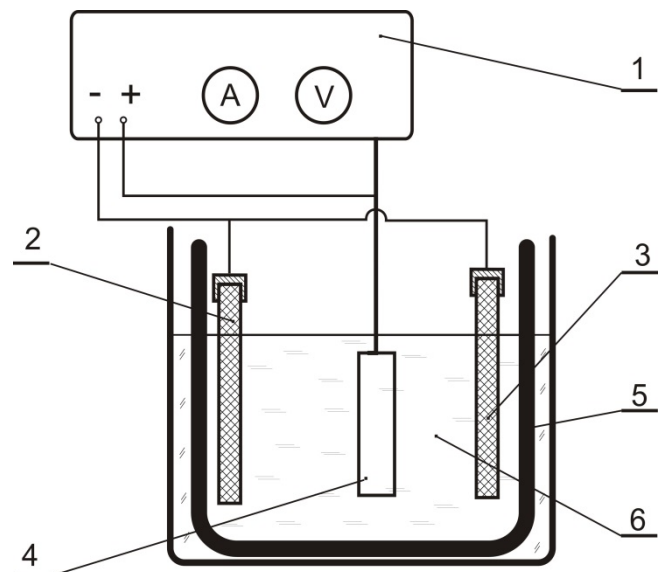
Czas polerowania wynosił 20 minut, przy zachowaniu podanych (tab.1) parametrów prądowych. Dalsze jego przedłużenie nie spowodowało zwiększenia połysku i znaczącej zmiany chropowatości powierzchni. Zarówno przed jak i po obróbce zostały wykonane pomiary chropowatości na profilografometrze RANK TAYLOR HOBSON TALLY FORM SERIES120L. Przedstawione wyniki stanowią średnią trzech pomiarów wykonanych na odcinku pomiarowym o długości

20 mm, z zadaniem krokiem próbkowania 0,25 μm . Po polerowaniu elektrochemicznym powierzchni ściany bocznej zaobserwowano oprócz zmniejszenia chropowatości do $R_a=0,15 \mu\text{m}$ i znacznego zwiększenia połysku zanik śladów obróbki ścierniej.

Kierunkowość obróbki jest cechą charakterystyczną większości obróbek mechanicznych. Oprócz polerowania elektrochemicznego tylko nieliczne metody (np. obróbka strumieniowo-ścierna) pozwalają uzyskać powierzchnie anizotropowe, jednak zwykle nie mogą być one stosowane zamiennie.



Rys. 5. Stanowisko do polerowania elektrochemicznego



Rys. 6. Schemat stanowiska do polerowania elektrochemicznego: 1 - zasilacz, 2,3 - katody, 4 - przedmiot obrabiany (anoda), 5 - zbiornik elektrolitu, 6 - elektrolit

Przedstawione na rys. 7 i 8 profilogramy pokazują chropowatość powierzchni badanego przedmiotu po szlifowaniu

oraz po polerowaniu elektrochemicznym. Z rozkładu profilu chropowatości widać korzystniejsze ukształtowanie geometrii powierzchni po polerowaniu niż po szlifowaniu.

Profil polerowanej elektrochemicznie powierzchni ma minimalną ilość wystających wierzchołków nierówności. Ogranicza to w znacznym stopniu możliwość zaczepiania się włókien celulozowych i tworzenia zlepek widocznych jako wady (zgrubienia) w gotowej wstędze papieru.

Podsumowanie

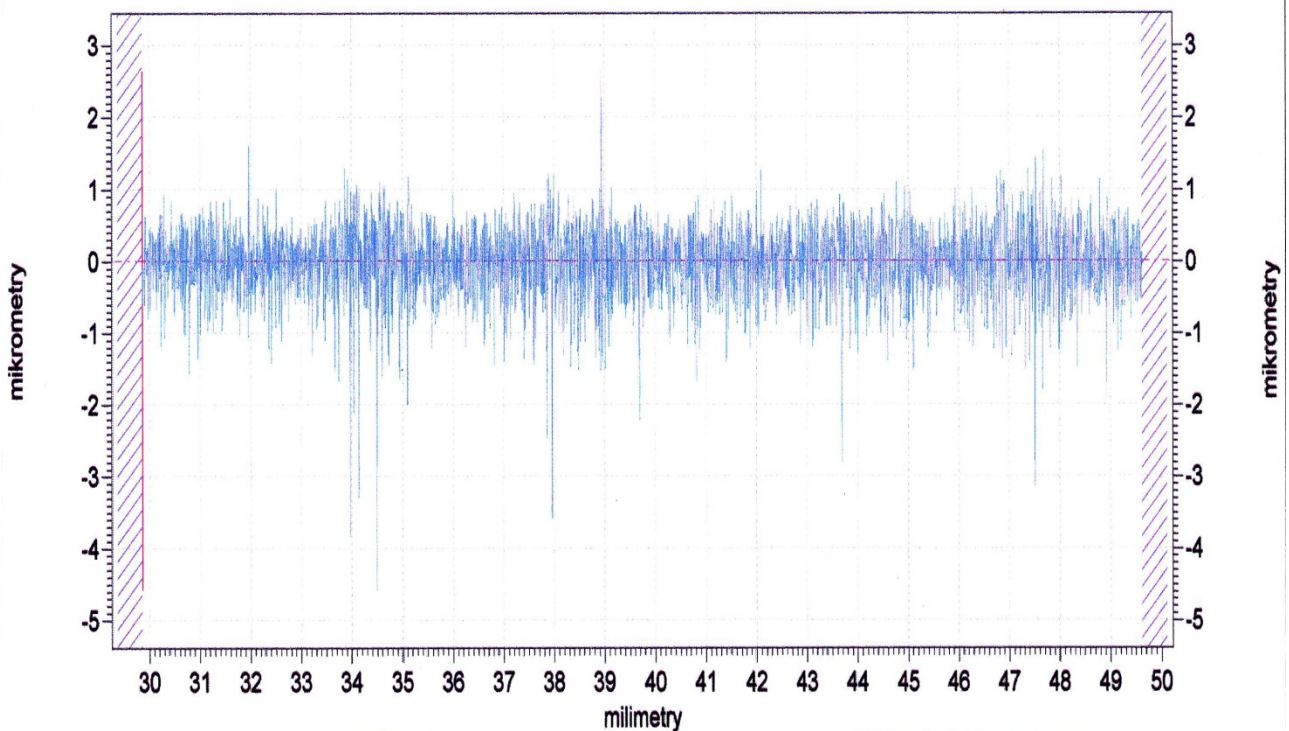
Maszyna papiernicza składa się z wielu elementów, z których kluczowym zespołem jest wlew, zwany sercem maszyny. Ściany boczne wlewu maszyny papierniczej stanowią zaporę ograniczającą szerokość tworzącej się wstęgi papieru. Mają one bardzo istotny wpływ na jakość formowanej wstęgi. Ze względu na agresywne środowisko pracy i na

posiadać wymagane właściwości. W rozpatrywanym przykładzie wysoce pożądana jest odpowiednia struktura geometryczna powierzchni. Istotnym warunkiem prawidłowej pracy wlewu jest zminimalizowanie lub nawet zupełne wyeliminowanie czepliwości włókien celulozowych o mikronierówności powierzchni.

Wśród wielu metod obróbek wykończeniowych polerowanie elektrochemiczne najlepiej spełnia postawione wymagania. Jako obróbka bezstykowa nie wprowadza naprężeń oraz zmniejsza naprężenia powstałe w wyniku obróbek poprzednich.

Na jakość produkowanego papieru istotny wpływ mają wartości chropowatości wszystkich wewnętrznych powierzchni wlewu, między innymi powierzchni czołowych ścian bocznych.

Profil zmodyfikowany szlif 2 - 1 - R/79x0.25mm/G/100/Prosta LS

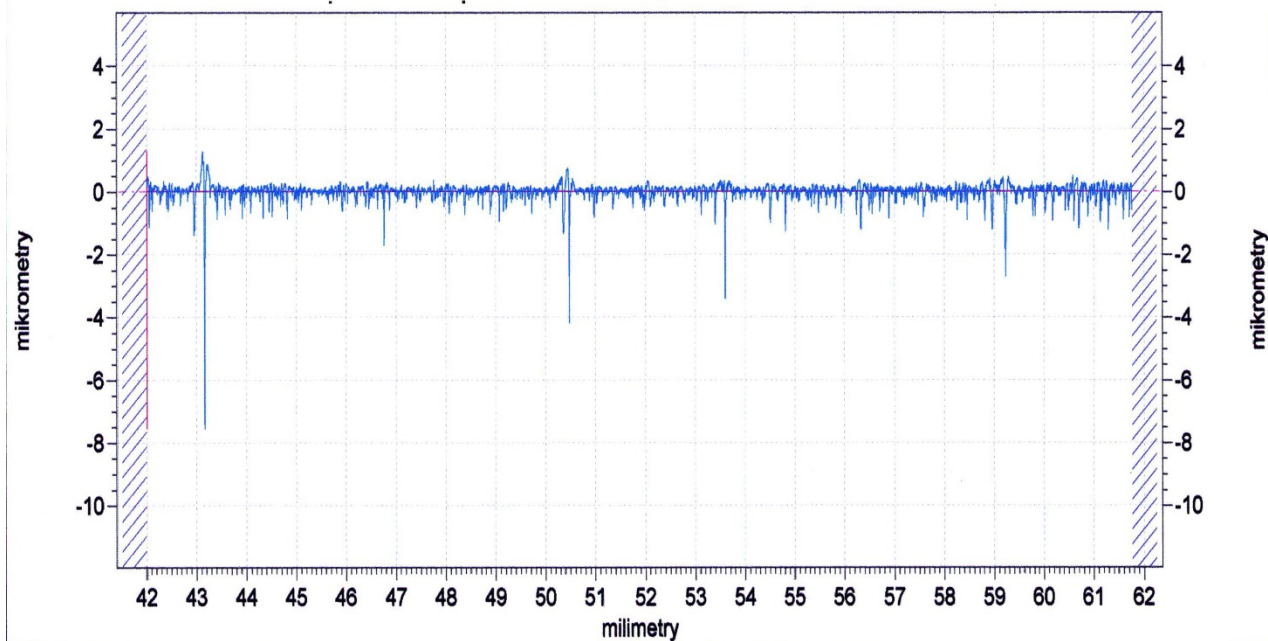


		Nachylenie	0,152	°	Rz(JIS)	1,4542	µm		
Ra	0,3291	µm	Rq	0,4469	µm	R3z	1,3459	µm	
Rsk	-1,1327		Rku	9,6190		R3y	2,1864	µm	
Rp	0,8907	µm	Rv	1,3694	µm	Rz(DIN)	2,2601	µm	
RLo	19,9365	mm	Rt	7,2097	µm	Rmr(c) (1)	53,00	%	Wysokość (średnia) 0,000 µm
Rlq	20,08	µm	Rdq	7,96	°	RHSC (1)			Wysokość (średnia) 0,000 µm
Rda	5,69	°	Rz	2,2601	µm	Rdc (1)	7,2097	µm	mr1% 0,0 % mr2% 100,0 %
RS	14,28	µm	RSm	57,96	µm	Rmr (1)	50,00	%	offset 0,000 µm mr% 50,00 %
Rln	19,7500	mm	Rc	1,5457	µm	RVo (1)	0,0181	il.	offset 0,000 µm mr% 50,00 %
						RPc (1)	496,2	pk./cm	Wysokość (średnia) 0,000 µm szerokość pasma 0,00 µm

charakterystykę masy celulozowej powierzchni wlewu muszą być odporne na korozję, a warstwa wierzchnia powinna

Rys. 7. Profilogram powierzchni ściany bocznej wlewu po szlifowaniu.

Profil zmodyfikowany polerow. 2 próbka 1-1 - 2 - R/79x0.25mm/G/100/Prosta LS



		Nachylenie	0,067	°Rz(JIS)	0,4591	µm								
Ra	0,1562	µm	Rq	0,3046	µm	R3z	0,3586	µm						
Rsk	-8,8412		Rku	165,3510		R3y	0,7416	µm						
Rp	0,2835	µm	Rv	0,8672	µm	Rz(DIN)	1,1507	µm						
RLo	19,7814	mm	Rt	8,8252	µm	Rmr(c) (1)	64,72	%	Wysokość (średnia)	0,000	µm			
Rlq	33,12	µm	Rdq	3,31		°RHSC (1)			Wysokość (średnia)	0,000	µm			
Rda	2,15		°Rz	1,1507	µm	Rdc (1)	8,8252	µm	mr1%	0,0	%	mr2%	100,0	%
RS	16,69	µm	RSm	2468,75	µm	Rmr (1)	50,00	%	offset	0,000	µm	mr%	50,00	%
Rln	19,7500	mm	Rc	3,2921	µm	RVo (1)	0,0100	il. offset	0,000	µm	mr%	50,00	%	
						RPc (1)	428,9	pk./cm	Wysokość (średnia)	0,000	µm	szerokość pasma	0,00	µm

Rys. 8. Profilogram powierzchni ściany bocznej wlewu po polerowaniu elektrochemicznym

Po polerowaniu elektrochemicznym ściany bocznej otrzymano chropowatość $R_a=0,156 \mu\text{m}$, co stanowiło zmniejszenie o około 50% w stosunku do obróbki poprzedniej. Uzyskano również znaczny połysk powierzchni, oceniony na podstawie wzorców na ponad 85%.

W wyniku polerowania elektrochemicznego uzyskano korzystne ukształtowanie geometryczne powierzchni, z minimalną ilością wystających wierzchołków chropowatości, dzięki czemu zminimalizowano możliwość zaczepiania włókien celulozowych i tworzenia przez nie zlepów wpływających niekorzystnie na jakość papieru.

LITERATURA

- Hryniewicz T., Technologia powierzchni i powłok, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004.
- Hryniewicz T., Wybrane zagadnienia polerowania elektrochemicznego, Praca doktorska., ITBM Politechnika Wroclawska, Wrocław 1978.
- Klikiewicz Z., Kawka Z., Teoria i budowa maszyn papierniczych, Część 1., Wydawnictwa Naukowo-Techniczne., Warszawa 1973.
- Klikiewicz Z., Teoria i budowa maszyn papierniczych, Część 2., Wydawnictwa Naukowo-Techniczne., Warszawa 1977.
- Nawrat G., Badania nad elektropolowaniem stali nierdzewnej. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1980
- Praca zbiorowa, Poradnik galwanotechnika, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- Rokosz K., Polerowanie elektrochemiczne stali w polu magnetycznym., Monografia Nr 219, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012.
- Tegart W. J. Mc G. Elektrolyczne i chemiczne polerowanie metali, WNT, Warszawa 1961.
- VOITH, www.voith.com 2012.
- Zaborski S., Sudzik A. Wpływ rodzaju prądu elektrycznego na efekty polerowania elektrochemicznego metali szlachetnych. Artykuł SNOE, Warszawa 2008.
- Zaborski S., Sudzik A, Polerowanie mechaniczne i elektrochemiczne wyrobów z blachy nierdzewnej i stopu tytanu, NSOŚ Gdańsk-Jurata 2006,
- Zaborski S., Łupak M., Michalski M., Dobór ekologicznego elektrolitu do polerowania elektrochemicznego stopów aluminium, W: Budowa maszyn i zarządzanie produkcją, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
- Praca zbiorowa, Chemia fizyczna, PWN, Warszawa 1980.