

CHOMKA Grzegorz, KASPEROWICZ Maciej, BIL Tadeusz
Zakład Teorii Mechanizmów i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechnika Koszalińska

Wykorzystanie strugi wodno-lodowej do czyszczenia powierzchni elementów maszyn i urządzeń oraz pomieszczeń przemysłu spożywczego

Streszczenie

Niniejsze opracowanie przybliży zagadnienia związane z czyszczeniem powierzchni elementów maszyn przemysłu spożywczego z wykorzystaniem wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej. Opisano w nim sposób wykorzystania takiej technologii w przemyśle spożywczym, a także rezultaty uzyskane w wyniku działania strugi na materiał podłoża. Prace badawcze zrealizowano na stanowisku prototypowym zbudowanym z wykorzystaniem stacjonarnego hydromonitora wyposażonego w trójnurnikową pompę wodną. Celem pracy była identyfikacja i analiza efektywności zastosowania suchego lodu w systemie wysokociśnieniowego mycia powierzchni elementów maszyn przemysłu spożywczego. Efekty pracy badawczej zestawiono w postaci opracowań graficznych i przeprowadzono dyskusję na temat zastosowania takiej technologii mycia maszyn i urządzeń w branży spożywczej.

Słowa kluczowe: mikropęknięcia, mikrostruktura powierzchni, struga wodno-lodowa, ciśnienie robocze, masowy wydatek lodu

The use of ice-water stream for surface cleaning elements of machines and devices and food industry premises

Summary

This paper introduces issues associated with cleaning the surface elements of machines in food industry with high-pressure stream of water-ice. It describes the use of this technology in the food industry, and the results achieved by the action of jets on the cleaned surface. Research work was carried out on prototype test stand, consisted of a stationary hydromonitor equipped with a three-plunger water pump. The aim of this study was to identify and analyze the effectiveness of the use of dry ice in the high-pressure surface cleaning elements of machines in food industry. The effects of the research work summarized in the graphic form, and conducted a discussion about the usefulness of this technology during surface cleaning elements of machines and equipment in food industry.

Key words: micro cracks, surface microstructure, ice-water stream, working pressure, mass expense of ice

Wykaz oznaczeń:

m_L – Masowy wydatek suchego lodu [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$];
 Q_F – Powierzchniowa wydajność czyszczenia [$\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$];

ΔQ_F – Przyrost powierzchniowej wydajności czyszczenia [$\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$];
 p_w – Ciśnienie strugi wodno-lodowej [MPa].

Określenie problemu

Do usuwania zanieczyszczeń z powierzchni elementów maszyn i urządzeń stosowanych w przemyśle spożywczym najczęściej wykorzystywane są metody: strumieniowo-chemiczne i mechaniczne. Jednak nieumiejętne ich stosowanie prowadzi do:

- obecności środków chemicznych na powierzchniach mytych, pomimo wielokrotnego płukania;
- niedokładnego oczyszczenia powierzchni z pozostałości produkcyjnych;
- zniszczenia powierzchni mytych;
- dużego zużycia wody, związanego z koniecznością wielokrotnego spłukiwania.

W związku z powyższym, poszukuje się alternatywnych metod oczyszczania powierzchni, nienaruszających podłoża oraz wykluczających możliwość dostania się środków chemicznych do produktów. Jedną z takich metod jest mycie za pośrednictwem wysokociśnieniowej strugi wodnej. Polega ona na usuwaniu zanieczyszczeń poprzez odrywa-

nie ich od powierzchni za pomocą miejscowo skoncentrowanej energii kinetycznej, jaką niesie ze sobą wysokociśnieniowa struga wody.

W przypadku przemysłu np. lakierniczego, w celu zwiększenia skuteczności oczyszczania powierzchni tą metodą, stosuje się różnego rodzaju domieszki ziaren ściernych. Pozwala to obniżyć ciśnienie robocze cieczy, jednak powoduje, że narzędziem erozji nie jest już czysta chemicznie i mechanicznie woda, lecz zawiesina wodno-ścierna. Skuteczność obróbki strugą wodno-ścierną jest znacznie wyższa niż osiągnięta przy użyciu strugi wodnej. Jednak pozostające na obrabianej powierzchni drobiny ścierniwa wykluczają możliwość jej zastosowania do oczyszczania powierzchni mających kontakt z produktem spożywczym.

W ostatnich latach, oprócz wysokociśnieniowej strugi wodnej oraz wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej, czy też wodno-ścierno-lodowej (Borkowski i in. 2007; Borkowski i in. 2008), do oczyszczania powierzchni, szczególnie popularne stało się stosowanie strugi wodno-

lodowej (Geskin i in. 1999; Borkowski i in. 2008) i gazowo-lodowej (Dunsky i in. 1995; Liu i in. 1999). Strugę nośną stanowi wysokociśnieniowy strumień wody lub gazu (najczęściej powietrza). Często także nośnikiem strugi bywa ciekły azot, amoniak oraz ciekły dwutlenek węgla. Typowe ziarna ścierne zastępuje kruszony lód wodny lub cząsteczki suchego lodu CO₂. Technika czyszczenia strugą wodno-lodową znajduje zastosowanie tam, gdzie nie można stosować strugi wodno-ściernej, a struga wodna zapewnia niewielką efektywność obróbki. Cząstki lodu wodnego lub suchego lodu CO₂ stanowią więc swoisty zamiennik ziaren ściernych i prowadzą do intensyfikacji procesu obróbki. Zastosowanie takiej metody oczyszczania powierzchni w przemyśle spożywczym miałyby na celu:

- ograniczenie zużycia środków chemicznych w systemach mycia maszyn, urządzeń oraz pomieszczeń przemysłu spożywczego;
- ograniczenie negatywnego wpływu popłuczyn na środowisko naturalne związane z sublimacją środka czyszczącego (zestalonego CO₂) do atmosfery;
- zwiększenie dokładności mycia powierzchni przy mniejszym zużyciu wody;
- ograniczenie zarysowań powierzchni związanych z mechanicznymi metodami mycia.

Charakterystyka obiektu badań

Przemysł przetwórstwa spożywczego charakteryzuje się dużą różnorodnością obrabianych surowców. Ponieważ są to surowce biologiczne, w ich skład wchodzi przede wszystkim: tłuszcze, białka, węglowodany. Składniki, które w warunkach podwyższonej lub obniżonej temperatury, intensywnej mechanicznej obróbki lub długotrwałego przechowywania, tworzą substancje mocno przylegające do powierzchni, z którymi mają styczność. Większość z tych substancji charakteryzuje się dużą elastycznością, dlatego tak ciężko jest je usunąć. Najczęściej wykorzystywane metody mycia tak zabrudzonych powierzchni to stosowanie wodnych roztworów środków chemicznych, połączonych z wysoką temperaturą. Środki te, po procesie mycia, muszą zostać usunięte poprzez długotrwałe spłukiwanie. Metoda ta świetnie się sprawdza, ma jednak dużą wadę, istnieje ryzyko dostania się środków chemicznych do obrabianych surowców.

W celu wyeliminowania środków chemicznych z procesów mycia, można wykorzystać elastyczność zabrudzeń, która pod wpływem niskich temperatur ulega dość znacznemu obniżeniu. Zapewnienie więc, odpowiedniej kruchości tych osadów poprzez obniżenie ich temperatury pozwoli skuteczniej oczyścić powierzchnie myte bez użycia detergentów. W przypadku mycia powierzchni za pomocą wysokociśnieniowej strugi wodnej, miejscowe obniżenie temperatury obrabianej powierzchni można uzyskać poprzez dodanie do strugi wodnej ziaren suchego lodu, którego średnia temperatura wynosi -78,5°C.

Metoda badań

Prace badawcze zrealizowano na stanowisku prototypowym zbudowanym z wykorzystaniem stacjonarnego hydromonitora wyposażonego w trójnurnikową pompę wodną. Wytwarzała ona wysokociśnieniową strugę wodną. Struga pod zadanym ciśnieniem trafiała do pistoletu wod-

nego, na którego lufie osadzono koncentryczny tryskacz z rurową kierownicą o zmiennej długości. W korpusie tryskacza umieszczono koncentryczną dyszę czterootworową o średnicy otworów wodnych 1,2 mm.

Jako materiału ziarnistego, używano zestalonego dwutlenku węgla, zwanego suchym lodem o temperaturze 194,6 K, (-78,5°C). W wyniku dostarczenia energii, lód przechodzi z fazy stałej w stan gazowy, z pominięciem fazy ciekłej. Efektem sublimacji cząstek suchego lodu podczas ich rozpędzania w strudze wodnej, jest charakterystyczne zadyminienie unoszące się na wylocie z kierownicy tryskacza oraz w strefie obróbki. Gęstość cząstek suchego lodu w stanie stałym wynosi 1564 kg·m⁻³, a ich twardość ocenia się na 2 ÷ 3 w skali Mohsa, co stanowi równowartość pomiędzy solą kamienną, a kalcylem. Do badań stosowano walcowe cząstki suchego lodu o średnicy 1,9 mm i długości około 5,5 mm.

Materiały wykorzystywane do produkcji maszyn i urządzeń występujących w przemyśle spożywczym to w głównej mierze aluminium, stal nierdzewna i tworzywa sztuczne, czyli teflon. Z tego względu, wybrano do badań stal nierdzewną chromowo-niklową X5CrNi18-10 w postaci blachy piekarniczej oraz stop aluminium, pokryty warstwą teflonu w formie patelni.

Blachę piekarniczą oraz patelnię pokryto substancją składającą się z kilkakrotnie przypalanej mąki i tłuszczu. Osady takie powstają podczas procesów produkcyjnych. Tak przygotowane powierzchnie poddano procesowi mycia za pomocą wysokociśnieniowej strugi wodnej z domieszką suchego lodu. Wyniki badań zestawiono w formie graficznej.

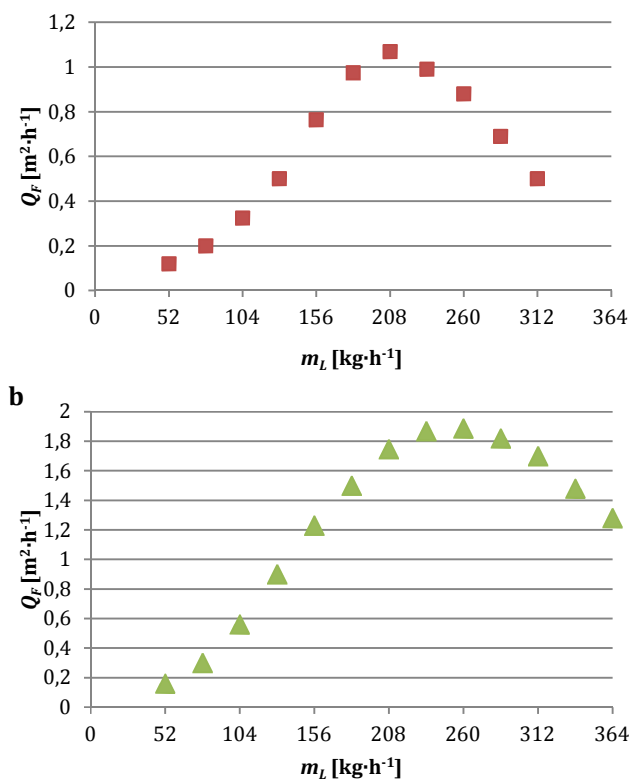
Wyniki badań i ich analiza

Wpływ wydatku suchego lodu na powierzchniową wydajność czyszczenia

Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że wraz ze wzrostem wydatku cząstek suchego lodu domieszkowanego do wysokociśnieniowej strugi wodnej uzyskuje się zwiększenie powierzchniowej wydajności czyszczenia. W początkowym okresie, zwiększanie masowego natężenia przepływu CO₂ prowadzi do intensywnego wzrostu powierzchniowej wydajności czyszczenia, po czym obserwuje się występowanie tzw. maksymalnego granicznego wydatku CO₂, jakim należy domieszkować strugę wodną, aby wydajność obróbki była jak największa. Dalszy wzrost wydatku suchego lodu prowadzi do powolnego spadku powierzchniowej wydajności czyszczenia. Zbyt duże natężenie przepływu cząstek CO₂ powoduje „dławienie” przepustu dyszy nadmiarem lodu. Wówczas, struga wodna nie jest w stanie rozpędzić cząstek suchego lodu tak, aby uzyskały one maksymalną prędkość. Dlatego, cząstki suchego lodu przy zbyt dużym ich natężeniu przepływu posiadają mniejszą energię kinetyczną w porównaniu z cząstkami, które zostają w pełni przyspieszone. W efekcie końcowym następuje spadek powierzchniowej wydajności usuwania zabrudzeń. Typowe przykłady takich zmian uzyskanych podczas obróbki próbek stalowych zamieszczono na rysunku 1, oraz aluminiowych przedstawiono na rysunku 2.

W przypadku stalowych elementów linii technologicznych, stosowanych w przemyśle spożywczym, czyszczonych stru-

gą wodno-lodową o ciśnieniu $p_w = 20$ MPa, zwiększenie masowego natężenia przepływu suchego lodu prowadzi do uzyskania większej powierzchniowej wydajności czyszczenia Q_F . Po przekroczeniu jednak pewnej jego wartości następuje spadek wydajności czyszczenia. Przy małych wydatkach zużytego lodu $m_L = 52$ kg·h⁻¹, uzyskano wydajność powierzchniową $Q_F = 0,12$ m²·h⁻¹. Czterokrotny wzrost wydatku suchego lodu, zużytego podczas czyszczenia do poziomu $m_L = 208$ kg·h⁻¹, pozwolił na usunięcie zanieczyszczeń $Q_F = 1,07$ m²·h⁻¹, co jest wielkością ponad 9 razy większą, niż zanotowana dla próbek czyszczonych strugą o niskiej zawartości CO₂. Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że w przypadku stalowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym, czyszczenie strugą wodno-lodową o ciśnieniu $p_w = 20$ MPa zapewnia największą powierzchniową wydajność obróbki przy zastosowaniu masowego natężenia przepływu suchego lodu w granicach $m_L = 208$ kg·h⁻¹.



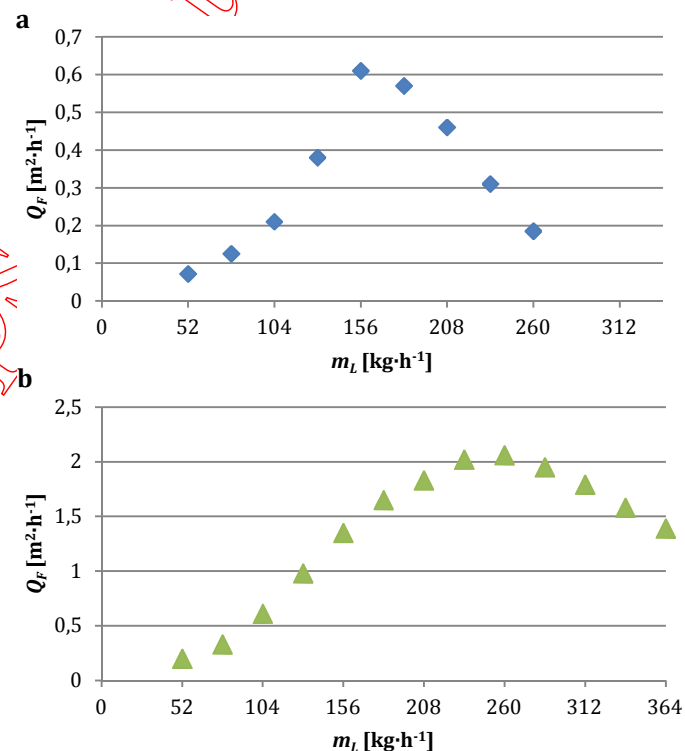
Rys. 1. Wpływ wydatku suchego lodu CO₂ na powierzchniową wydajność czyszczenia stalowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym: a – $p_w = 20$ MPa; b – $p_w = 30$ MPa

Fig. 1. Effect of dry ice flow for surface cleaning of steel components used in the food industry: a – $p_w = 20$ MPa; b – $p_w = 30$ MPa

Po zwiększeniu ciśnienia wody do $p_w = 30$ MPa, utrzymanie masowego natężenia przepływu suchego lodu na poziomie $m_L = 52$ kg·h⁻¹, zapewnia uzyskanie powierzchniowej wydajności czyszczenia $Q_F = 0,16$ m²·h⁻¹. Zwiększenie wydatku suchego lodu do $m_L = 104$ kg·h⁻¹, powoduje wzrost powierzchniowej wydajności czyszczenia do $Q_F = 0,56$ m²·h⁻¹. Dla wydatku suchego lodu $m_L = 156$ kg·h⁻¹ notuje się intensywny wzrost powierzchniowej wydajności czyszczenia do wartości $Q_F = 1,23$ m²·h⁻¹. Wzrost masowego natężenia przepływu suchego lodu do $m_L = 208$ kg·h⁻¹, zapewnia osiągnięcie powierzchniowej wydajności czyszczenia na poziomie $Q_F = 1,74$ m²·h⁻¹. Dalsze zwiększanie wydatku CO₂

do $m_L = 260$ kg·h⁻¹, daje rezultat $Q_F = 1,88$ m²·h⁻¹. Spadek powierzchniowej wydajności czyszczenia odnotowuje się dla wydatku suchego lodu $m_L = 286$ kg·h⁻¹. Przy takim wydatku CO₂ powierzchniowa wydajność czyszczenia wynosi $Q_F = 1,82$ m²·h⁻¹ i spada do wielkości $Q_F = 1,28$ m²·h⁻¹ dla $m_L = 364$ kg·h⁻¹.

Aby oczyścić 1,07 m² powierzchni pokrytej osadami „produkcijnymi”, stosując strugę wodno-lodową o ciśnieniu $p_w = 20$ MPa i wydatku suchego lodu $m_L = 156$ kg·h⁻¹, należałoby zużyć około 220 kg CO₂, czyli o 12 kg suchego lodu więcej, niż w przypadku uzyskania tego wyniku dla $m_L = 208$ kg·h⁻¹, a czas obróbki wzrosłby o 0,5 h. W przypadku zastosowania strugi wodno-lodowej o masowym natężeniu przepływu CO₂ $m_L = 104$ kg·h⁻¹ wyniki są jeszcze bardziej przekonujące. Zużycie lodu wzrosłoby z 208 kg na 348 kg, a czas konieczny do przeprowadzenia tej obróbki wynosiłby 3,34 h. Z ekonomicznego punktu widzenia obróbka strugą wodno-lodową o natężeniu przepływu CO₂ na poziomie $m_L = 208$ kg·h⁻¹ jest najbardziej efektywna dla strugi o ciśnieniu $p_w = 20$ MPa, a ilość domieszkowanych cząstek suchego lodu jest istotnym parametrem wpływającym na wydajność obróbki.



Rys. 2. Wpływ wydatku suchego lodu CO₂ na powierzchniową wydajność czyszczenia aluminiowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym: a – $p_w = 10$ MPa, b – $p_w = 30$ MPa

Fig. 2. Effect of dry ice flow for surface cleaning of aluminum components used in the food industry: a – $p_w = 10$ MPa, b – $p_w = 30$ MPa

W przypadku usuwania osadów z aluminiowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym, zwiększanie masowego natężenia przepływu lodu CO₂ prowadzi do uzyskiwania coraz większej powierzchniowej wydajności czyszczenia. Trwa to, aż do wystąpienia pewnego granicznego wydatku suchego lodu, po którym obserwuje się spadek efektywności czyszczenia, co przedstawiały również wcześniej opisane przykłady. W przypadku zastosowania strugi wodno-lodowej o ci-

śnieniu $p_w = 10$ MPa i masowym natężeniu przepływu CO_2 $m_L = 104$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, uzyskuje się powierzchniową wydajność czyszczenia $Q_F = 0,21$ $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$. Zwiększenie ilości domieszkowanego lodu do $m_L = 156$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ sprawia, że powierzchniowa wydajność czyszczenia wzrasta niemal 3-krotnie. Zastosowanie zaś strugi z masowym natężeniem przepływu suchego lodu $m_L = 260$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ sprawia, że powierzchniowa wydajność czyszczenia obniża się do wartości $Q_F = 0,19$ $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$. Jak łatwo więc zauważyć, zużywając 260 kg suchego lodu, można w ciągu 1 h oczyścić 0,19 m^2 zanieczyszczonej powierzchni aluminiowej elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym, a taka sama ilość CO_2 , przepływająca z masowym natężeniem przepływu $m_L = 156$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, pozwala oczyścić 1,02 m^2 , co stanowi 5,3-krotne zwiększenie oczyszczonej powierzchni w czasie dłuższym o zaledwie 0,67 h. Zastosowanie zaś strugi o $m_L = 104$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, umożliwia oczyszczenie 0,53 m^2 , a czas obróbki wyniesie 2,5 h. Oczyszczając aluminiowe elementy linii technologicznych stosowane w przemyśle spożywczym strugą wodno-lodową o ciśnieniu $p_w = 10$ MPa należy stosować strugę o masowym natężeniu przepływu suchego lodu $m_L = 156$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, co zapewni największą powierzchniową wydajność czyszczenia.

Przy zwiększeniu ciśnienia strugi wodnej do $p_w = 30$ MPa, uzyskana wartość masowego natężenia przepływu suchego lodu jest większa niż dla obróbki, prowadzonej przy ciśnieniu $p_w = 10$ MPa i wynosi około $m_L = 260$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Przy takich parametrach obróbki powierzchniowa wydajność czyszczenia wynosi $Q_F = 2,06$ $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$. Przykładowo, użycie takiej samej ilości zestalonego CO_2 , przy zapewnieniu wydatku $m_L = 104$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, umożliwia oczyszczenie 1,53 m^2 powierzchni w czasie 2,5 h. Wynika z tego, że bardziej ekonomicznym rozwiązaniem jest więc zastosowanie wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej o masowym natężeniu przepływu zestalonego CO_2 $m_L = 208$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$.

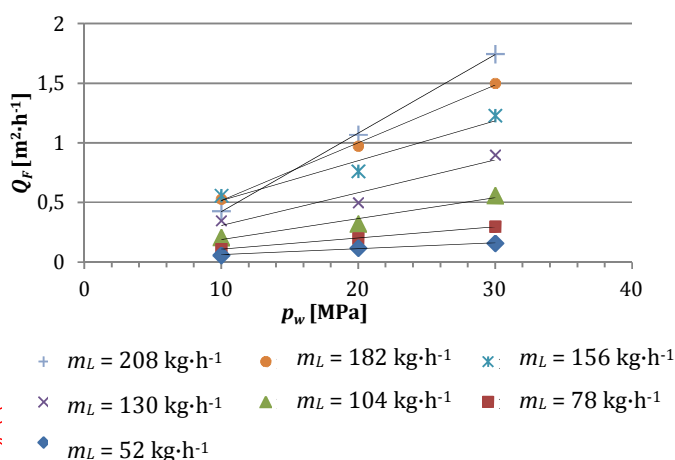
Wpływ ciśnienia wody na powierzchniową wydajność czyszczenia

Ze wzrostem ciśnienia strugi wodnej zwiększa się jej prędkość, a co za tym idzie, również prędkość cząstek suchego lodu, które są do niej domieszkowane. W takim przypadku, cząstki zestalonego CO_2 będą posiadały większą energię kinetyczną niż te, które były rozprężane przez strugę o niższym ciśnieniu. Zatem, wzrost ciśnienia strugi wody z pewnością powoduje zwiększenie powierzchniowej wydajności czyszczenia przy utrzymaniu pozostałych parametrów obróbki na niezmiennym poziomie.

Należy podkreślić, że pomimo złożonych relacji między parametrami procesu czyszczenia, końcowa zależność wydajności obróbki od ciśnienia strugi wodnej jest prawie wprost proporcjonalna. Przykład przedstawiono na rysunku 3.

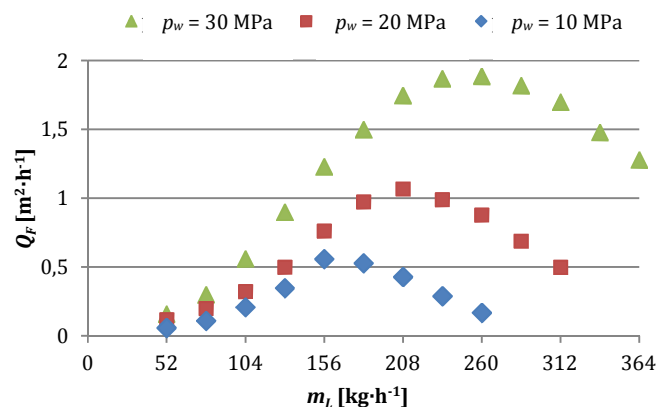
W przypadku oczyszczania blachy stalowej z osadów produkcyjnych, ciśnienie strugi wodno-lodowej zmieniano od $p_w = 10$ MPa, do $p_w = 30$ MPa z krokiem, co 10 MPa. Uzyskane przebiegi przedstawiono na rysunku 4. Z przeprowadzonych badań wynika, że wzrost ciśnienia strugi wodno-lodowej powoduje każdorazowo przyrost powierzchniowej wydajności czyszczenia zarówno w przypadku strugi z minimalnym, jak i maksymalnym wydatkiem CO_2 . W przypadku użycia strugi z masowym natężeniem przepływu suchego

$m_L = 52$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, przy wzroście ciśnienia wody z $p_w = 20$ MPa do $p_w = 30$ MPa, uzyskuje się przyrost powierzchniowej wydajności czyszczenia $\Delta Q_F = 0,04$ $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$, co stanowi poprawę o 34%. Dla strugi z wydatkiem suchego lodu $m_L = 104$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, obserwuje się poprawę o 69%, co daje przyrost powierzchniowej wydajności czyszczenia sięgający $\Delta Q_F = 0,24$ $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$. Przy dużych wydatkach lodu $m_L = 260$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, zapewniających największą wydajność obróbki dla strugi wodnej o ciśnieniu $p_w = 30$ MPa, następuje „dławienie” dyszy nadmiarem lodu, gdy stosuje się ciśnienia niższe. Struga wodna o niższym ciśnieniu nie jest w stanie rozprężyć wszystkich cząstek lodowych do maksymalnej prędkości i wówczas różnice w uzyskiwanej wydajności obróbki są naprawdę duże. Przykładowo, przy wydatku lodu $m_L = 260$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, wzrost ciśnienia strugi wodnej z $p_w = 20$ MPa do $p_w = 30$ MPa powoduje przyrost wydajności obróbki $\Delta Q_F = 1,01$ $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$, co stanowi poprawę o 114%.



Rys. 3. Wpływ ciśnienia strugi wodno-lodowej na powierzchniową wydajność czyszczenia stalowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym

Fig. 3. Effect of pressure of the dry ice stream for surface cleaning of steel components used in the food industry

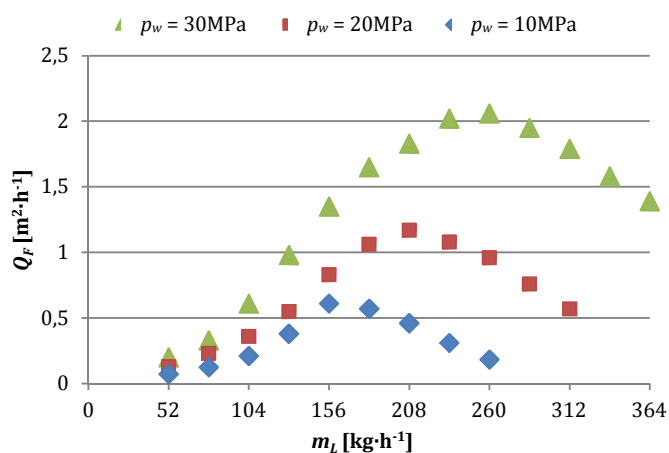


Rys. 4. Wpływ wydatku suchego lodu CO_2 na powierzchniową wydajność czyszczenia stalowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym dla strugi wodnej o ciśnieniu: $p_w = 10$ MPa, $p_w = 20$ MPa i $p_w = 30$ MPa

Fig. 4. Effect of dry ice flow for surface cleaning of steel components used in the food industry for pressure of stream: $p_w = 10$ MPa, $p_w = 20$ MPa and $p_w = 30$ MPa

W przypadku czyszczenia aluminiowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym, również obserwuje się wzrost powierzchniowej wydajności czyszczenia na skutek podwyższenia ciśnienia strugi wod-

no-lodowej. Jak można zauważyć na rysunku 5, nawet przy niskich ciśnieniach rzędu $p_w = 10$ MPa uzyskuje się powierzchniową wydajność czyszczenia od $Q_F = 0,21$ m²·h⁻¹, w przypadku, gdy masowe natężenie przepływu CO₂ $m_L = 104$ kg·h⁻¹, do $Q_F = 0,46$ m²·h⁻¹ dla strugi z 2 - krotnie większym wydatkiem suchego lodu. W wyniku wzrostu ciśnienia strugi wodno-lodowej do $p_w = 20$ MPa, uzyskuje się przyrost wydajności czyszczenia $\Delta Q_F = 0,15$ m²·h⁻¹, stanowiący poprawę o 71%, dla najmniejszego z prezentowanych wydatków CO₂. Wzrost ciśnienia strugi wodno-lodowej o kolejne 10MPa, przy nie zmienionych pozostałych parametrach obróbki, daje przyrost powierzchniowej wydajności czyszczenia $\Delta Q_F = 0,40$ m²·h⁻¹, 190% w stosunku do wartości osiągniętych przy ciśnieniu $p_w = 10$ MPa. Dla strugi, o masowym natężeniu przepływu suchego lodu $m_L = 208$ kg·h⁻¹, otrzymane wartości są nieco inne. Mianowicie, dla ciśnienia strugi wodno-lodowej $p_w = 20$ MPa, otrzymuje się powierzchniową wydajność czyszczenia $Q_F = 1,17$ m²·h⁻¹, co stanowi przyrost o 154%, a gdy ciśnienie strugi wodno-lodowej wynosi $p_w = 30$ MPa to wydajność ta wzrasta do $Q_F = 1,83$ m²·h⁻¹, dając tym samym przyrost o 297%. Zwiększenie ciśnienia strugi wodno-lodowej z $p_w = 10$ MPa, do $p_w = 20$ MPa, dla strugi z wydatkiem lodu $m_L = 260$ kg·h⁻¹, daje przyrost powierzchniowej wydajności czyszczenia $\Delta Q_F = 0,78$ m²·h⁻¹, czyli uzyskuje się o 433% większą wydajność. Natomiast wzrost ciśnienia strugi wodno-lodowej z $p_w = 20$ MPa, do wartości $p_w = 30$ MPa, powoduje przyrost powierzchniowej wydajności czyszczenia o $\Delta Q_F = 1,10$ m²·h⁻¹, co stanowi wzrost o 114%.



Rys. 5. Wpływ wydatku suchego lodu CO₂ na powierzchniową wydajność czyszczenia aluminiowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym dla strugi wodnej o ciśnieniu $p_w = 10$ MPa, $p_w = 20$ MPa i $p_w = 30$ MPa

Fig. 5. Effect of dry ice flow for surface cleaning of aluminum components used in the food industry for pressure of stream: $p_w = 10$ MPa, $p_w = 20$ MPa, and $p_w = 30$ MPa

Podsumowanie

W przypadku czyszczenia stalowych lub aluminiowych elementów linii technologicznych stosowanych w przemyśle spożywczym dla uzyskania najlepszej powierzchniowej wydajności obróbki, należy zastosować zwiększone natężenie przepływu zestalonego CO₂. Z przeprowadzonych badań wynika, że jest to związane przede wszystkim z właściwościami jakie posiadają usuwane zanieczyszczenia. Charakteryzują się one dużą elastycznością, która pod

wpływem niskich temperatur ulega dość znacznemu obniżeniu. Zapewnienie więc odpowiedniej kruchości tych osadów, poprzez obniżenie ich temperatury, jest w tym przypadku istotnym elementem obróbki.

Wzrost wydatku suchego lodu powoduje, że o powierzchnię czyszczoną uderza większa liczba cząstek suchego lodu. Dzięki temu zwiększa się objętość gazu CO₂ powstającego w strefie czyszczenia. Gwałtowne powstawanie gazu CO₂, wywołuje bardzo duże spiętrzenia dynamicznego ciśnienia gazu wciskającego wodę w szczeliny istniejące w wierzchniej warstwie zabrudzeń. W konsekwencji prowadzi to do powiększania szczelin i rozrywania pęknięć, które w następstwie doprowadzają do mikrowykruszeń w czyszczonej warstwie zabrudzeń. Zbyt duże natężenie przepływu cząstek CO₂ powoduje, że nie są one w stanie osiągnąć maksymalnej prędkości, co sprawia, że zmniejsza się ich energia kinetyczna w porównaniu z cząstkami, które zostają w pełni przyspieszone przez wysokociśnieniową strugę wodną. Prowadzi to do spadku powierzchniowej wydajności czyszczenia.

Bibliografia

1. Borkowski J., Borkowski P. 2008. *Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, ISSN 0239-7129.
2. Borkowski P., Chomka G. 2007. *High-pressure water-ice jet creation and its applicatin for surface treatment*. Unconventional Hydrojetting Technologies. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, ISBN 978-83-7365-138-8.
3. Dunsky C. M., Hashish M. 1995. *Feasibility study of the use of ultrahigh-pressure liquefied gas jets for machining of nuclear fuel pins*. Proc. of the 8th American Water Jet Conference, Houston, Texas, Vol. II, p. 505-517.
4. Geskin E. S., Shishkin D., Babets K. 1999. *Application of ice particles for precision cleaning of sensitive surfaces*. Proc. of the 10th American Waterjet Conference, Houston, Texas, Vol. I, p. 315-333.
5. Liu H. T., Fang S., Hibbard C., Maloney J. 1999. *Enhancement of ultrahigh-pressure technology with LN2 cryogenic jets*. Proc. of the 10th American Waterjet Conference, Houston, Texas, Vol. I, p. 297-313.

Grzegorz Chomka

nr tel. (0-94) 34 78 477,

grzegorz.chomka@tu.koszalin.pl

Maciej Kasperowicz

nr tel. (0-94) 34 78 325,

maciej.kasperowicz@tu.koszalin.pl

Tadeusz Bil

nr tel. (0-94) 34 78 475,

tadeusz.bil@tu.koszalin.pl

Politechnika Koszalińska,

Zakład Teorii Mechanizmów i Podstaw Konstrukcji Maszyn,

ul. Raclawicka 15 - 17

75 - 620 Koszalin,

pobrano z www.ips.wm.tu.koszalin.pl