Gabriel Borowski, Józef Kuczmaszewski

UTYLIZACJA DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW METALOWYCH

Lublin 2005

Wydanie książki finansowane przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji w ramach projektu badawczego nr PB 1144/T07/02/22.

Opiniodawca
dr hab. inż. Marek Bieliński, prof. ATR

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska, Lublin 2005 r.

Zabrania się reprodukowania w każdej formie i za pomocą jakichkolwiek środków technicznych oraz rozpowszechniania całości lub fragmentów niniejszej pracy bez zgody wydawcy

ISBN 83-89246-29-5

Przygotowanie do druku
Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski
ul. Poniatowskiego 1, 20-060 Lublin

WYDAWCA
Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
20-109 Lublin, ul. Bernardyńska 13
e-mail: wydawnictwo@pollub.pl

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ 5

WPROWADZENIE 7

1. PROBLEMY UTYLIZACJI ODPADÓW 9
   1.1. Rodzaje, właściwości oraz klasyfikacja odpadów 9
   1.2. Wykorzystanie surowców odpadowych 20
   1.3. Specyfika przemysłowych odpadów drobnoziarnistych i technologie ich utylizacji 30
   1.4. Piśmiennictwo 41

2. ODPADY Z OBRÓBKI SZLIFIERSKIEJ I ICH WŁAŚCIWOŚCI 44
   2.1. Specyfika procesu szlifowania 44
   2.2. Mechanizm powstawania wióra i czynniki wpływające na jego właściwości 45
   2.3. Składniki odpadów w procesie szlifowania 47
      2.3.1. Szlifowany materiał 47
      2.3.2. Materiały ścierne 47
      2.3.3. Spoiwa 49
      2.3.4. Ciecze technologiczne 50
   2.4. Piśmiennictwo 51

3. FIZYKOCHEMICZNE ASPEKTY PROCESU BRYKIETOWANIA DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW METALOWYCH 52
   3.1. Układy kompozytowe i ich właściwości 52
      3.1.1. Właściwości układów kompozytowych o wzmocnieniu ziarnistym 52
      3.1.2. Suszenie, rozdrabnianie, mieszanie 55
   3.2. Elementy teorii adhezji 59
      3.2.1. Ważniejsze teorie adhezji 60
      3.2.2. Adhezja w ujęciu molekularno-kinetycznym 71
      3.2.3. Adhezja w ujęciu termodynamicznym 72
      3.2.4. Znaczenie adhezji w procesie scalania drobnoziarnistych odpadów metalowych 79
   3.3. Piśmiennictwo 81

4. PRASY DO BRYKIETOWANIA METALOWYCH ODPADÓW DROBNOZIARNISTYCH 83
4.1. Prasy stemplowe 83
4.2. Prasy walcowe 86
4.3. Piśmiennictwo 91

5. PRZYKŁAD ANALIZY BADAWCZEJ UTYLIZACJI DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW METALOWYCH 92
5.1. Plan analizy badawczej 92
5.2. Charakterystyka i ocena właściwości łożyskowych odpadów poszlifierskich 94
5.3. Czynniki określające podatność odpadów na scalanie 100
5.4. Dobór dodatków wiążących 106
5.5. Badania procesu zagęszczania poszlifierskiego szlamu odpadowego w płytowej prasie filtracyjnej 107
5.6. Badania procesu brykietowania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w prasie stemplowej 112
5.7. Badania procesu brykietowania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w prasie walcowej 120
5.8. Analiza mikroskopowa struktury brykietów 125
5.9. Ocena przydatności brykietów dla przemysłu hutniczego 135
5.10. Badanie szkodliwości emisji pyłów do atmosfery podczas próbnego przetopu w laboratoryjnym piecu hutniczym 139
5.11. Opracowanie koncepcji przemysłowej linii technologicznej do brykietowania drobnoziarnistych materiałów odpadowych w prasach walcowych 141
5.12. Piśmiennictwo 145

6. ASPEKTY EKONOMICZNE I EKOLOGICZNE UTYLIZACJI BRYKIETÓW 146
6.1. Podstawowe zasady obowiązujące w polskim prawie ochrony środowiska 146
6.2. Podstawy teoretyczne oceny efektywności finansowej inwestycji 149
6.3. Przykład analizy finansowej utylizacji brykietów 154
6.4. Piśmienictwo 164

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI 165

SUMMARY 168

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a_0 – kąt chwytu
ϕ – kąt styku
γ_L – swobodna energia powierzchniowa kleju
η – lepkość kleju
μ – współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego
σ_{la} – napięcie powierzchniowe na granicy ciecz–gaz
θ – kąt zwilżania
ρ_0 – gęstość początkowa materiału
ρ_n – średnia gęstość brykietu
$\sigma_{(r,z)}$ – naprężenie normalne
σ_w – naprężenia własne
$\tau_{(r,z)}$ – naprężenia ścinające
ν' – pozorna liczba Poissona
A – stała van der Waalsa
C – wytrzymałość cząstek
c_v – objętościowe stężenie napełniacza
d – stopa dyskonta
D – średnica szlifowanego walca
$d_{śr}$ – średnia stopa podatku dochodowego
E' – pozorny moduł Younga
E_p – energia powierzchniowa
E_{npv} – zdyskontowana wartość oczekiwana
E_r – współczynnik sprężystości wzdłużnej
F_i – siła wiązania i-tego typu
h – głębokość wnikania kleju w mikronierówności
H – twardość
H_p – wysokość początkowa zagęszczanego materiału
K – odporność brykietu na zrzut
K_0 – współczynnik sprężystości podłużnej
K_n – nominalny koszt kapitału
l – zprzemieszczenie stempla
M – masa brykietu
M_p – masa początkowa
n – liczba moli
N – nakłady początkowe
p – ciśnienie
S_n – powierzchnia nominalna

W_{ad} – praca adhezji
Q_o – ciepło odprowadzane do otoczenia
R – promień matrycy
R_0 – promień walców roboczych brykieciarki
R_r – wytrzymałość na rozciąganie
S – powierzchnia
s_i – stopa inflacji
F – siły oddziaływań międzycząsteczkowych
S_{npv} – odchylenie standardowe
s – stopień zagęszczania
t – czas zagęszczania
T – temperatura
V_n – objętość fazy rozpraszającej
V_{sw} – objętość napełniacza
Z_{br} – zysk brutto
$Z_{nśr}$ – średni zysk netto

WPROWADZENIE

Odpady są nieodłącznym czynnikiem bytowej i gospodarczej działalności człowieka od zarania cywilizacji. W miarę jej rozwoju, proporcjonalnie do technologicznego postępu, zwiększa się różnorodność odpadów, a ich właściwości (fizyczne, chemiczne i biologiczne) różnią się coraz bardziej od materii pochodzenia naturalnego.

Proporcjonalnie do wzrostu liczby mieszkańców oraz ich poziomu konsumpcji wzrasta wytwarzanie odpadów. Degraduje to ekologiczno-zdrowotne, gospodarcze i społeczne warunki życia ludzi na określonych terenach. Może to stanowić barierę w zachowaniu i rozwoju cywilizacji. Postęp naukowy i technologiczny znajduje zwykle sposoby odnawiania zdegradowanego środowiska. Wymaga to jednak dużych nakładów finansowych, na które stać tylko zamożnych. Dalszy rozwój szeroko rozumianej działalności gospodarczej wymaga zatem powszechnej znajomości coraz to nowych technologii utylizacji odpadów. Wiedza taka powinna zapewnić ekologiczne bezpieczeństwo wszystkim obywatelom Ziemi.

Zagospodarowanie odpadów obejmuje zbieranie, transport, odzysk (wykorzystanie) i unieszkodliwianie. Każdy odpad powinien być skierowany do powtórnego użytku. Wykorzystanie odpadów polega na ich użyciu w celach przemysłowych lub nieprzemysłowych. W celach nieprzemysłowych wykorzystuje się przede wszystkim do nawożenia w rolnictwie i rekultywacji gleb zdegradowanych. Cele przemysłowe obejmują tzw. recykling materiałowy, czyli wykorzystanie odpadów bezpośrednio jako surowce wtórne albo – po odpowiednich operacjach przywracających im wartość użytkową – jako półfabrykaty lub materiał. Przemysłowe wykorzystanie odpadów obejmuje także recykling energetyczny, czyli przede wszystkim spalanie.

Odpady niebezpieczne pochodzące z przemysłu powinny być unieszkodliwione, czego efektem będzie eliminacja zawartych w nich szkodliwych i toksycznych składników. Substancje te mogą być eliminowane przez rozkład na związki nieszkodliwe i nietoksyczne, w wyniku których powstaną składniki nie stwarzające już zagrożenia dla środowiska naturalnego. Pozostawienie substancji szkodliwych i niebezpiecznych na składowiskach, nawet w bezpiecznych warunkach ich składowania, jest rozwiązaniem najbardziej niekorzystnym.

Proces unieszkodliwiania i przetwarzania odpadów powinien być przeprowadzany w warunkach zapewniających możliwie maksymalną jego efektywność. W przypadku drobnoziarnistych odpadów przemysłu metalowego dostępną i bezpieczną technologią jest odzysk surowca z użyciem filtracji, separacji i innych metod rozdzielania, a następnie jego powtórne wykorzystanie poprzez przetopienie w piecu hutniczym. Materiał przeznaczony do przetopu powinien posiadać formę kawałkową, np. w postaci brykietów.

Monografia przedstawia efektywne sposoby użytkowego wykorzystania drobnoziarnistych metalowych odpadów produkcyjnych. Odpowiednie przetwarzanie tych odpadów umożliwia ich utylizację poprzez przetopienie w piecu hutniczym. W efekcie uzyskuje się pełnowartościowe wyroby stalowe.

Autorzy wyrażają przekonanie, że niniejsza książka przyczyni się do poszerzenia wiedzy umożliwiającej skuteczne realizowanie procesów przetwarzania i recyklingu drobnoziarnistych odpadów metalowych. Zdaniem Autorów prezentowane zagadnienia, zarówno o charakterze teoretycznym, jak i aspekty praktyczne wraz z wieloma przykładami już istniejących rozwiązań, przydatne będą dla studentów, pracowników ośrodków naukowo-badawczych, a przede wszystkim dla kadry inżynieryjno-technicznej krajowych przedsiębiorstw wytwarzających metalowe odpady drobnoziarniste.

1. PROBLEMY UTYLIZACJI ODPADÓW

1.1. Rodzaje, właściwości oraz klasyfikacja odpadów

W gospodarce zasobami i w ochronie środowiska niezbędne jest zakwalifikowanie odpadów do określonej grupy. Podstawą każdej klasyfikacji są odpowiednio dobrane kryteria o charakterze fizykochemicznym, biologicznym, technologicznym, ekonomicznym jak np. [39]:

- źródło pochodzenia – sfera powstawania,
- kryterium surowcowe,
- stan skupienia,
- skład chemiczny,
- toksyczność,
- stopień zagrożenia dla środowiska,
- przydatność do dalszego wykorzystania.

Według Ustawy o odpadach (Dz.U. 01.62.628) odpady klasyfikuje się w zależności od źródeł powstawania, stopnia uciążliwości bądź stwarzania zagrożeń dla życia lub zdrowia ludzi oraz dla środowiska. W problematyce dotyczącej ochrony środowiska rozpatruje się i klasyfikuje odpady, jako substancje pochodzące z produkcji lub konsumpcji, które zanieczyszczają środowisko. Przy klasyfikacji odpadów w oparciu o kryterium toksyczności i zagrożenia dla środowiska przyjmuje się, że o ich szkodliwości decyduje:

- składnik najniebezpieczniejszy, który jednocześnie determinuje przynależność odpadów do odpowiedniej kategorii szkodliwości i określa technologię jego utylizacji,
- toksyczność i szkodliwość odpadu dla organizmów żywych,
- właściwości rakotwórcze substancji odpadowych,
- zagrożenie dla wód powierzchniowych i gleby na podstawie wielkości dopuszczalnych zanieczyszczeń śródlądowych wód powierzchniowych I klasy czystości,
- zanieczyszczenie atmosfery przez odpady pylące, wydzielające pary lub gazy szkodliwe i o nieprzyjemnym zapachu,
- łatwość zapłonu.

Ze względu na właściwości odpadów, a głównie udział frakcji organicznej, dzieli się je na:

- mineralne, zawierające znikomą ilość (do 1%) substancji organicznej,
- organiczno-mineralne, zawierające 5–50% substancji organicznej,
- organiczne, w których udział substancji organicznej wynosi więcej niż 50%.

Klasyfikacja odpadów wg Rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 24 grudnia 1997 r. (Dz.U. 97.182.1135), w zależności od źródła powstawania odpadów, wyróżnia 20 następujących ich grup [39]:

1. Odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobyciu i wzbogacaniu rud oraz innych surowców mineralnych – 01.
2. Odpady z rolnictwa, hodowli, rybołówstwa, leśnictwa oraz przetwórstwa żywności – 02.
3. Odpady z przetwórstwa drewna oraz produkcji papieru, tektury, masy celulozowej, płyt i mebli – 03.
4. Odpady z przemysłu skórzanego i tekstylnego – 04.
5. Odpady z przeróbki ropy naftowej, oczyszczania gazu ziemnego oraz wysokotemperaturowej przeróbki węgla – 05.
6. Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania związków nieorganicznych – 06.
7. Odpady z przemysłu syntezy organicznej – 07.
8. Odpady z produkcji, przygotowania, obrotu i stosowania powłok ochronnych (farb, lakierów, emalii ceramicznych), kitu, klejów, szczeliw i farb drukarskich – 08.
9. Odpady z przemysłu fotograficznego – 09.
10. Odpady nieorganiczne z procesów termicznych – 10.
11. Odpady nieorganiczne z przygotowania powierzchni powlekania metali oraz z procesów hydrometalurgii metali nieżelaznych – 11.
12. Odpady z kształtowania i powierzchniowej obróbki metali i tworzyw sztucznych – 12.
13. Oleje odpadowe (z wyłączeniem olejów jadalnych oraz grup 05 i 12) – 13.
14. Odpady z rozpuszczalników organicznych (z wyjątkiem grup 07 i 08) – 14.
15. Odpady opakowań, sorbentów, tkanin, materiałów filtracyjnych i ochronnych, nie ujęte w innych grupach – 15.
16. Odpady różne, nie ujęte w innych grupach – 16.
17. Odpady z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz drogowych – 17.
18. Odpady z działalności służb medycznych i weterynaryjnych oraz związanych z nimi badań – 18.
19. Odpady z urządzeń do likwidacji i neutralizacji odpadów oraz oczyszczania ścieków i gospodarki wodnej – 19.
20. Odpady komunalne – 20.

Uwzględniając warunki powstawania, główne składniki, właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne, odpady podzielono na:

- grupy – odpady o wspólnym pochodzeniu a tym samym i właściwościach,
- typy – odpady bliskie pod względem głównych składników i właściwości,
- gatunki – dokładniej określają chemiczne, fizyczne i biologiczne właściwości,
- rodzaje – określają specyficzne właściwości odpadu w ramach gatunku.

Jednolita klasyfikacja odpadów opracowana przez J. Siutę dzieli je na 27 grup. Wyróżniono i scharakteryzowano następujące grupy odpadów [40]:

- Odchody zwierzęce. Stałe i ciekłe odchody zwierzęce wraz ze ściółką i pozostałościami paszy, gromadzone w miejscach stałego przebywania (chowu) zwierząt (w tym ptaków). Są one odpadami tylko wtedy, gdy nie zostały wykorzystane jako nawóz. Do stałych odchodów zwierzęcych zalicza się: obornik bydlęcy, koński (stajenny), trzody chlewnej (chlewniowy), owczy, ptasi (pomiot), zwierząt futerkowych i zwierząt z ogrodów zoologicznych. Do płynnych odchodów zwierzęcych zalicza się gnojowicę i gnojówkę. Właściwości gnojowicy zależą, podobnie jak właściwości obornika, głównie od gatunku i sposobu żywienia zwierząt.
- Odpady zwierzęce. Zalicza się tu padlinę i konfiskaty tusz podczas chowu i produkcji zwierząt gospodarczych oraz odpady z uboju i przetwórstwa mięsnego (kości, krew, tłuszcze, skóra, rogowizna, sierść, szczecina i włosie, pierze, jelita, treść pokarmowa itp.), mlecznego, jajczarskiego i rybnego oraz z przemysłu farmaceutycznego i garbarskiego, a także z produkcji futrzarskiej.
- Odpady z produkcji roślinnej. Zalicza się do nich masę roślinną nie spożytkowaną (w handlu jako pokarm, pasza lub nawóz) w gospodarstwie rolnym (ogrodniczym, ogrodzie działkowym, stacji doświadczalnej), głównie: niehandlowe, niekonsumpcyjne i niepaszowe części roślin, nie spożytkowane i zepsute płody gospodarstwa, zepsute pasze i materiały nasienne pochodzenia zewnętrznego. Słoma, łodygi, listowie, plewy, nasiona chwastów, nadmiar owoców i warzyw oraz zepsute pasze są w coraz mniejszym stopniu traktowane jako zasoby nawozowe. Z tego powodu stają się odpadami. Przynosi to szkody gospodarcze i ekologiczne. Szkody ekologiczne bezpośrednie to uciążliwość odpadów w miejscu ich składowania, a pośrednie – zmniejszanie próchniczych i pokarmowych zasobów w glebie.
- Odpady drzewne. Powstają podczas pielęgnacji drzew i krzewów, pozyskiwania i obróbki drewna, usuwania zbędnych drzew i krzewów. Gospodarka leśna jest zasadniczym źródłem powstawania odpadów drzewnych. Na terenach mieszkaniowych, rekreacyjnych i przemysłowych niemal cała wytworzona i usuwana masa drzewna nie jest utylizowana i stanowi odpad. Poważnym źródłem odpadów drzewnych są naturalne zarośla, śródpolne

zadrzewienia i sadownicze plantacje. Drzewnymi odpadami są całe obumarłe i wyrwane drzewa i krzewy, gałęzie, kora, trociny, wióry, pnie i korzenie.

- Odpady z wydobywania kopalin. Powstają podczas udostępniania i wydobywania węgla, rud i surowców skalnych. Zalicza się do nich głównie: przemieszczane na zwałowiska masy nadkładu i międzyzłożowe warstwy w górnictwie odkrywkowym, usuwane na zwałowiska masy skalne, wydobywane podczas budowy szybów i chodników w górnictwie podziemnym, a także oddzielaną z urobku skałę płonną oraz osady (szlamy) technologiczno-górnicze.
- Odpady z uzdatniania kopalin. Powstają w toku wzbogacania (uszlachetniania) węgla kamiennego, rud siarki, miedzi, cynku i ołowiu. Największe masy tej grupy odpadów stanowią szlamy z mokrego wzbogacania (głównie flotacyjnego) i żużle z termicznego wzbogacania kopalin. Bardzo szkodliwe dla środowiska są odpady pirytu powstające z uzdatniania węgla kamiennego.
- Odpady żywności roślinnej. Powstają z przetwórstwa owoców i warzyw w przemyśle ziemniaczano-skrobiowym, cukrowniczym, gorzelnianym, browarniczym, winiarskim, zbożowym, olejowym, zielarskim i piekarskim, podczas przechowywania i konsumpcji żywności oraz obrotu nią. Głównymi źródłami powstawania tych odpadów są: zakłady produkujące żywność dla ludzi i pasz dla zwierząt, przechowalnie żywności i pasz oraz roślinnych i zwierzęcych surowców służących do ich produkcji, ośrodki (punkty) dystrybucji żywności i pasz, zakłady zbiorowego żywienia (w tym różnego rodzaju stołówki), nierolnicze gospodarstwa domowe.
- Odpady tekstyliów. Powstają głównie w zakładach produkujących tekstylne materiały i odzież oraz w punktach gromadzenia (w tym odbioru zorganizowanego) poużytkowej odzieży, bielizny, opakowań i pozostałych przedmiotów tekstylnych.
- Odpady włókien naturalnych. Powstają z produkcji i użytkowania tych włókien.
- Odpady włókien syntetycznych. Powstają z produkcji (syntezy) surowców oraz wytwarzania i użytkowania tych włókien.
- Odpady drewna. Powstają we wszystkich etapach obróbki i użytkowania drewna. Poużytkowe przedmioty drewniane (w tym meble) stanowią znaczną część mieszaniny odpadów bytowo-gospodarczych. Do tej grupy odpadów zalicza się je wtedy, gdy są odbierane selektywnie.
- Podstawowymi odpadami z obróbki drewna są trociny, kora, zrzyny, wióry, zrębki, strużyny, pyły. Zalicza się też do nich poużytkowe podkłady kolejowe, kopalniaki, opakowania, deski szalunkowe, rusztowania, stolarkę budowlaną i meble.

- Odpady papieru i kartonu. Zalicza się tu odpady z przetwarzania surowca papierowego (i kartonowego) na produkty finalne oraz poużytkowe części papieru i jego produktów. Do tej grupy nie zaliczane są poprodukcyjne i poużytkowe części papieru (i kartonu) gromadzone i składowane w mieszaninie odpadów bytowo-gospodarczych.
- Odpady ropy i jej pochodnych. Powstają w transporcie i przetwórstwie ropy naftowej oraz podczas użytkowania jej pochodnych. Zalicza się też do nich silnie zaolejone tkaniny, niemetaliczne filtry, sorbenty (diatomity, jonity) itp.
- Odpady chemiczne. Zalicza się do nich stałe i płynne odpady z syntezy chemicznej i przetwórstwa chemicznego oraz poużytkowe i przeterminowane chemikalia: kwasy, zasady, sole nieorganiczne i organiczne, rozpuszczalniki, tworzywa sztuczne i polimery. W tej grupie odpadów znajdują się zarówno chemikalia o bardzo dużej toksyczności i chemicznej reaktywności, jak też o umiarkowanej szkodliwości dla środowiska. O szkodliwości odpadów dla środowiska, oprócz ich reaktywności, decyduje masowość ich wytwarzania i składowanie do gruntu.
- Odpady gumy. Zaliczają się do nich technologiczne odpady z przemysłu gumowego i poużytkowe części gumy (z oponami włącznie).
- Odpady szkła. Zalicza się do nich technologiczne odpady z produkcji szkła i wyrobów szklanych oraz poużytkowe części szkła (w tym opakowań szklanych).
- Odpady metali żelaznych. Zalicza się do nich odpady z wytopu żelaza i przetwarzania go na produkty finalne oraz poużytkowe wyroby z żelaza i stali. Nie zalicza się do tej grupy złomu sprzętu technicznego (motoryzacyjnego) i złomu poużytkowego zmechanizowanego sprzętu domowego.
- Odpady metali nieżelaznych. Są to technologiczne odpady z wytopu metali nieżelaznych oraz przetwarzania ich na produkty finalne, a także poużytkowe wyroby z tych metali.
- Złom sprzętu technicznego. Złom różnego rodzaju pojazdów mechanicznych (samochodów, motocykli, pojazdów i maszyn samobieżnych) i wielkowymiarowego sprzętu domowego i gastronomicznego (lodówki, pralki, zmywarki).
- Osady z oczyszczalni ścieków i uzdatniania wody. Powstają z mechanicznego, biologicznego i chemicznego oczyszczania ścieków oraz z uzdatniania wody (na potrzeby bytowe i produkcyjne). Mogą one występować w różnym stopniu uwodnienia (ciekłe, maziste, ziemiste). Oczyszcza się ścieki przemysłowe, bytowo-gospodarcze z osiedli i małych miast oraz przemysłowo-miejskie. Największą różnorodnością chemicznych, fizycznych i biologicznych właściwości odznaczają się osady z oczyszczania ścieków przemysłowych.

- Odpady budowlane. Zalicza się do nich nie zagospodarowane części materiałów budowlanych w miejscach ich wytwarzania i na placach budowy, a także produkty z remontu i rozbiórki różnego rodzaju budowli, utwardzonych dróg i placów. Podstawowymi odpadami budowlanymi są: kamienie, ceramika, beton (żelbeton), stal, drewno, szkło, asfalt, mieszanina gruzu i pyłu. Ilość i jakość odpadów z remontów i rozbiórki budowli o analogicznej strukturze zmienia się zależnie od rodzaju i stopnia odzysku materiałów budowlanych i surowców wtórnych.
- Odpady paleniskowe, pyły i szlamy. Należą do nich żużle i popioły lotne z przemysłowego (energetycznego i ciepłowniczego) spalania węgla kamiennego i brunatnego, produkty suchego i mokrego odpylania powietrza z termicznej i mechanicznej obróbki żelaznych i nieżelaznych metali oraz suche i mokre produkty oczyszczania odlotowych gazów technologicznych. Odrębny rodzaj odpadów w tej grupie stanowią zużyte (suche i mokre) filtry wraz z zatrzymanymi produktami oczyszczania gazów odlotowych. Wyróżnia się:
  – odpady paleniskowe (żużle, popioły lotne, mieszaniny żużli i popiołów lotnych),
  – pyły i szlamy z suchego i mokrego odpylania powietrza w zakładach obróbki metali,
  – pyły i szlamy z oczyszczania gazów technologicznych,
  – zużyte filtry suchego i mokrego odpylania (oczyszczania) gazów technologicznych (odlotowych).
- Zanieczyszczona ziemia. Ziemię zanieczyszczoną chemicznie, biologicznie lub fizycznie w stopniu zagrażającym środowisku należy sanitować na miejscu lub usuwać z miejsc zalegania oraz poddać stosownej obróbce lub wyizolować z otoczenia. Dotyczy to głównie ziemi w miejscach awaryjnych wylewów oraz wysypów toksycznych i bardzo aktywnych chemikaliów, ziemi silnie zaolejonej, skażonej radioaktywnie i organizmami chorobotwórczymi, silnie zasolonej oraz o nadmiernej zawartości szkodliwych metali ciężkich. Do tej grupy zalicza się także grunty powstałe z dawniej składowanych odpadów o wymienionych właściwościach w wypadku, gdy zachodzi konieczność usunięcia ich z miejsca aktualnego zalegania.
- Osady denne. Masy ziemne usuwane podczas budowy i odnowy dróg wodnych w portach, kanałach żeglownych i rzekach, z zamulonych starorzeczy, zbiorników retencyjnych i stawów rybnych oraz wielofunkcyjnych (często bliżej nie określonych) osadników (np. rozlewisk cieków intensywnie zanieczyszczonych – Utrata, Ner). Osady denne mogą być sortowane i częściowo wykorzystywane. Oddzielenie piasku od części pyłowych i koloidalnych umożliwia większą koncentrację składników uciążliwych dla środowiska.

- Odpady bytowo-gospodarcze (komunalne). Powstają w miejscach stałego i czasowego przebywania ludzi (mieszkania, praca, nauka, wypoczynek). Głównymi źródłami tych odpadów są: gospodarstwa domowe, handel detaliczny, gastronomia, rzemiosło i usługi dla ludności, zieleń miejska i przemysłowa, ulice i place. Do odpadów bytowo-gospodarczych nie zalicza się przedmiotów, których wymiary narzucają odrębny sposób postępowania z nimi (tzn. usuwania, utylizacji i unieszkodliwiania). Nieselektywnie gromadzone odpady stanowią mieszaninę różnorodnych pozostałości bytowej i gospodarczej działalności człowieka i towarzyszących mu zwierząt niegospodarskich. Głównymi ich składnikami są: papier, karton, tworzywa sztuczne, szkło, ceramika, guma, metale, żywność pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, popiół, żużel, gruz, zmiotki, listowie, drewno. Wszystkie wymienione odpady mogą być selektywnie gromadzone, utylizowane i unieszkodliwiane. Najczęściej segregowane są odpady żywności, tekstyliów, papieru i kartonu, tworzyw sztucznych oraz szkła i metali. Zgromadzone w ten sposób odpady powinny być ewidencjonowane.
- Odpady radioaktywne. Radioaktywnymi nazywa się materie (niezależnie od ich pochodzenia) o radioaktywności przekraczającej wielkość dopuszczalną według obowiązujących norm prawnych. Odpady radioaktywne powstają w elektrowniach atomowych, urządzeniach wykorzystujących paliwa nuklearne oraz szpitalach i ośrodkach naukowych stosujących radioizotopy. W elektrowniach atomowych powstają one w trakcie różnych operacji: chłodzenia, czyszczenia, obsługi, naprawy. Tego rodzaju odpady powstają także z pozyskiwania i uzdatniania kopaliny uranowej oraz z przeróbki poużytkowego paliwa nuklearnego. Może charakteryzować je mała, średnia lub duża promieniotwórczość. Odpady o małej promieniotwórczości nie wymagają ekranizacji w czasie przechowywania i transportowania. Potrzebują jej natomiast odpady o promieniotwórczości średniej. Duża promieniotwórczość charakteryzuje przede wszystkim ciecze zawierające produkty rozczepiania i aktynowce oddzielane w toku chemicznej obróbki napromieniowanego paliwa odpadowego z pierwszego cyklu ekstrakcji rozpuszczalnikami wraz z zawartymi w nich strumieniami odpadów oraz zużyte radioaktywne paliwo.
- Odpady inne. Zalicza się do nich m.in.: odpady formierskie i rdzeniarskie, masy ziemne (grunty) usuwane w budownictwie, pozostałości po spalaniu odpadów organicznych (głównie bytowo-gospodarczych) i po kompostowaniu odpadów bytowo-gospodarczych, wykładziny podłogowe (w tym dywany i chodniki).

Główny Urząd Statystyczny stosuje własną klasyfikację, gdzie wymienione są grupy największych źródeł wytwarzania odpadów przemysłowych oraz ich rodzaje według tradycyjnego (własnego) podziału i według europejskiej

klasyfikacji. Przykład zestawienia ilości odpadów wytworzonych przez główne ich źródła oraz zdeponowanych na składowiskach pokazano w tabeli 1.1.

Statystyka GUS nie ujmuje olbrzymich mas ziemi przemieszczanych w górnictwie odkrywkowym, robotach ziemnych, z odmulania zbiorników i dróg wodnych. Brakuje też informacji o potencjalnej użyteczności i sposobach użytkowania głównych rodzajów odpadów.

Tabela 1.1. Wytwarzanie i składowanie odpadów przemysłowych w 2001 r. [38]

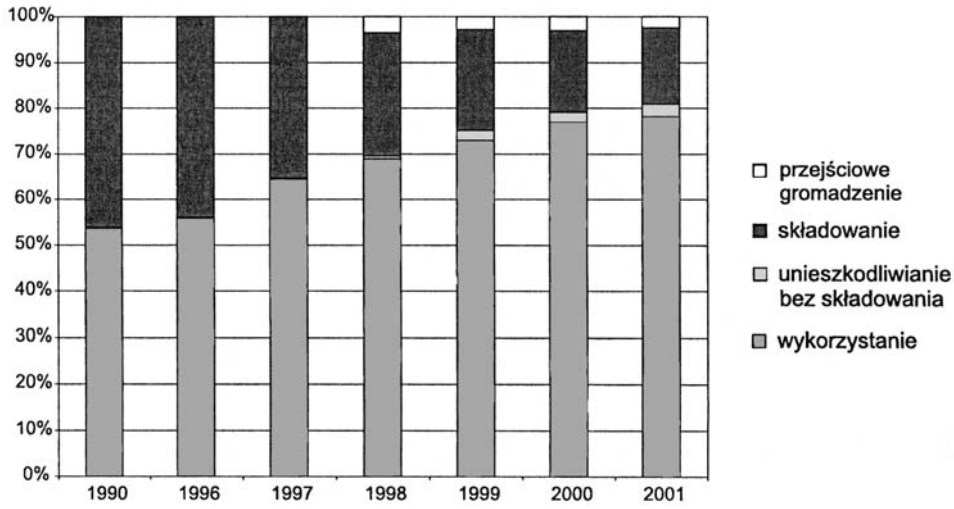
Rodzaj odpadu	Odpady wytworzone					Odpady nagromadzone w mln ton
	ogółem w mln t	wykorzystane w %	unieszkodliwione w %		gromadzone przejściowo w %	
			razem	w tym składowane		
Odpady przeróbcze ze wzbogacania węgla	35,0	90,1	9,9	9,1	–	657,2
Odpady z flotacyjnego wzbogacania rud metali nieżelaznych	29,9	75,8	22,4	22,4	1,8	558,3
Mieszanki popiołowo-żużlowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych	8,6	46,5	50,0	50,0	3,5	246,6
Popioły lotne z węgla kamiennego	5,2	93,2	4,0	3,9	2,8	45,3
Żużle z procesów wytapiania (wielkopiecowe, stalownicze)	2,9	93,6	0,6	0,6	5,8	28,2
Stałe odpady z wapniowych metod odsiarczania spalin	2,4	96,7	1,4	1,4	1,9	0,9
Skruszone skały	2,4	98,8	1,2	1,2	–	33,5
Ogółem	**123,8**	**78,2**	**19,3**	**16,6**	**2,5**	**1977,9**

W 2001 roku wytworzono 123,8 mln ton, z czego wykorzystano 96,8 mln t (78,2%) odpadów natomiast 23,6 mln t (19,1%) składowano i gromadzono przejściowo. Najwięcej odpadów, ponad 52%, powstaje podczas wzbogacania węgla i rud metali nieżelaznych (łącznie 64,9 mln t). Wykorzystanie tych odpadów wynosiło odpowiednio 90,1% oraz 75,8%.

Z danych w tabeli 1.1 wynika, że stosunkowo dużo wykorzystuje się odpadów typu popioły lotne, żużle z procesów hutniczych, skruszone skały oraz odpady z odsiarczania spalin. Największe nagromadzenie odpadów na składowiskach występuje w górnictwie, energetyce i hutnictwie. Areał zewidencjonowanych składowisk odpadów przemysłowych wynosi około 12000 ha. Do tego

dochodzą wysypiska i wylewiska odpadów komunalnych (w tym osadów z oczyszczania ścieków i uzdatniania wody).

Ilość odpadów powstających w Polsce w sektorze gospodarczym sukcesywnie maleje – od roku 1990 do 2001 zmniejszyła się o 14%. Zwiększył się jednocześnie stopień zagospodarowania tych odpadów – w roku 2001 wykorzystano o 24,6% więcej odpadów niż w roku 1990 (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Tendencja zmian w gospodarowaniu odpadami przemysłowymi w latach 1990–2001 [38]

W praktyce gospodarczej tzn. gospodarce materiałowej stosuje się klasyfikację tych odpadów, które stanowią potencjalne surowce wtórne. Klasyfikacja stanowi więc podstawę do jednoznacznych oznaczeń poszczególnych rodzajów surowców wtórnych umożliwiających właściwe odróżnienie poszczególnych grup zarówno przez dostawców jak i przez odbiorców Klasyfikacja taka (funkcjonująca od 1976 r.) oparta jest na konstrukcji wieloszczeblowej przy zastosowaniu różnych kryteriów podziału odpadów i jest dość szczegółowa i w miarę kompleksowa [39]. Według niej odpady podzielono na 5 podstawowych rodzajów: metaliczne, niemetaliczne, mineralne, komunalne i energii cieplnej. W drugim etapie klasyfikacji podstawą podziału poszczególnych rodzajów surowców wtórnych na grupy są ich źródła pochodzenia (miejsca powstawania). W trzecim etapie przyjęto niejednolite kryteria dla poszczególnych rodzajów surowców wtórnych. W odniesieniu do metalicznych, niemetalicznych i energii przyjęto kryterium surowcowe, dla mineralnych kryterium miejsca ich powstawania, natomiast dla komunalnych kryterium stanu skupienia. W czwartym stopniu

klasyfikacji za podstawę przyjęto kryterium właściwości fizykochemicznych lub technologicznych. Omawiana klasyfikacja, mimo wielu niedoskonałości, umożliwia jednak objęcie nią wszystkich surowców wtórnych i może być wykorzystywana w praktyce gospodarczej.

Odpady niebezpieczne – są to odpady, które ze względu na swoje pochodzenie, skład chemiczny, biologiczny i inne właściwości, stanowią zagrożenie dla ludzi lub środowiska. W roku 1996 odpady niebezpieczne stanowiły 3,5% masy odpadów przemysłowych ogółem, co w przeliczeniu na 1 mieszkańca stanowiło 134 kg. W roku 2001 natomiast, odpady niebezpieczne stanowiły 1,1% odpadów, co w przeliczeniu na 1 mieszkańca wynosiło 33,8 kg. W roku 2001 wytworzono 1308,50 tys. ton odpadów niebezpiecznych, w tym ok. 8,6% stanowiły odpady powstające podczas obróbki powierzchniowej i powlekania metali [38].

Odpady niebezpieczne stanowią grupę odpadów zagrażających w szczególny sposób zdrowiu ludzkiemu lub środowisku i z tego tytułu wymagającą specjalnego nadzoru nad ich powstawaniem i postępowaniem z nimi aż do unieszkodliwienia. Pierwszą czynnością tej szczególnej opieki jest określenie, które odpady należy uznać za niebezpieczne.

W prawodawstwie ochrony środowiska podstawowym kryterium oceny niebezpieczeństwa dla zdrowia ludzkiego i środowiska jest wielkość ryzyka związanego z zagrożeniem, którą można jeszcze akceptować. Im większe ryzyko, tym większa powinna być ochrona przed zagrożeniem. Ze względu na największy dopuszczalny poziom ryzyka odpady niebezpieczne należą do kategorii [40]:

1. Odpadów, których cechą wspólną jest pochodzenie (z działalności medycznej i weterynaryjnej, procesów rafinacji, destylacji, pirolizy, prace naukowo-badawcze, chemikalia fotograficzne) albo, które są odpadami poużytkowymi (środki konserwacyjne i impregnacyjne, oleje mineralne, substancje zawierające PCB) lub stanowią pozostałości ze stosowania (farmaceutyki, biocydy, fitofarmaceutyki, żywice).
2. Odpadów, których wspólną cechą jest pochodzenie z określonego procesu technologicznego (popioły i żużle, zużyte katalizatory, szlamy i osady z filtracji, dekantacji, uzdatniania wody, dekarbonizacji) lub posiadają wspólne składniki (mydła, tłuszcze, woski, pyły i proszki metaliczne, oleje roślinne, baterie, akumulatory, ogniwa elektryczne).

W katalogu odpadów zawartym w rozporządzeniu Ministra Środowiska odpady niebezpieczne wyróżniono gwiazdką (*). Przy nazwie części tych odpadów zamieszczono zwrot „zawierające substancje niebezpieczne", a po nich wymieniono odpady tego samego pochodzenia, ale z określeniem „inne niż wymienione" i nie wyróżnione gwiazdką. W przywołanym rozporządzeniu

przewidziano zatem, że odpady pochodzące z podobnych operacji technicznych mogą zawierać substancje niebezpieczne i właściwości odpadów niebezpiecznych, a mogą także nie mieć właściwości niebezpiecznych. Wykonujący ocenę musi zatem przeprowadzić postępowanie klasyfikacyjne odpadów w celu określenia, czy ich właściwości odpowiadają określonym kryteriom.

Właściwości odpadów niebezpiecznych określa się na podstawie właściwości ich składników. Składnikami odpadów są substancje chemiczne. Klasyfikacja substancji chemicznych jest przedmiotem ustawy o substancjach i preparatach chemicznych „Wykaz substancji niebezpiecznych wraz z ich klasyfikacją i oznakowaniem", stanowiący przedmiot rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 3 lipca 2002 r. w sprawie wykazu substancji niebezpiecznych wraz z ich klasyfikacją i oznakowaniem (Dz.U. 02.129.1110) [40].

W ustawie o substancjach i preparatach chemicznych pojęcie substancje chemiczne rozumie się jako pierwiastki chemiczne i ich związki w stanie, w jakim występują w przyrodzie lub zostają uzyskane za pomocą procesu produkcyjnego, ze wszystkimi dodatkami wymaganymi dla zachowania ich trwałości, oprócz rozpuszczalników, które można oddzielić bez wpływu na stabilność i skład substancji, i wszystkimi zanieczyszczeniami powstałymi w wyniku zastosowanego procesu produkcyjnego. Preparatem chemicznym w rozumieniu tej ustawy jest mieszanina lub roztwór składające się co najmniej z dwóch substancji.

W ustawie Prawo ochrony środowiska pojęcie substancja rozumie się jako pierwiastki chemiczne oraz ich związki, mieszaniny lub roztwory występujące w środowisku lub powstałe w wyniku działalności człowieka, a pojęcie substancja niebezpieczna rozumie się jako jedną lub więcej substancji albo mieszaniny substancji, które ze względu na swoje właściwości chemiczne, biologiczne lub promieniotwórcze mogą, w razie nieprawidłowego obchodzenia się z nimi, spowodować zagrożenie życia lub zdrowia ludzi lub środowiska; substancją niebezpieczną może być surowiec, produkt, półprodukt, odpad, a także substancja powstała w wyniku awarii.

Przy określeniu nazwy i kodu liczbowego odpadów należy posługiwać się katalogiem odpadów. Odpady w katalogu podzielono na trzy części [39]:

- odpady, które mogą być odpadami niebezpiecznymi,
- odpady inne niż niebezpieczne,
- odpady obojętne.

Rodzaje odpadów są w katalogu uszeregowane według ich pochodzenia. Pierwsze dwie cyfry kodu liczbowego odpadów określają jedną z 20 grup odpadów pochodzących z jednego z 20 sektorów, na które podzielono gospodarkę i wszelkie inne rodzaje działalności ludzkiej. Podział ten jest przyjęty w skali światowej i służy do celów statystyki.

1.2. Wykorzystanie surowców odpadowych

W gospodarce surowce odpadowe powstają zarówno podczas produkcji i eksploatacji wyrobów, jak również znajdują się w wyrobach zużytych i uszkodzonych. Możliwość ponownego wykorzystania tych surowców wynika z faktu, że stanowią one materiały odnawialne. Istnieje zatem sposób przywracania tym materiałom pierwotnych właściwości, odzyskania poszczególnych składników, lub usuwania z nich szkodliwych związków przez przeprowadzenie odpowiednich zabiegów [41].

Przetwarzanie surowców odpadowych w materiały użytecznie gospodarczo powoduje, że stają się one towarami. Proces ten przynosi następujące korzyści:

- przedłuża się okres eksploatacji wysypisk odpadów komunalnych i przemysłowych,
- zmniejszają się koszty transportu surowców składowanych na wysypiska.
- zmniejsza się zużycie surowców pierwotnych.

Pozyskanie i wykorzystanie surowców z odpadów pożytkowych jest na ogół bardziej skomplikowane i pracochłonne, niż z odpadów produkcyjnych. Surowce z odpadów pożytkowych stanowią najczęściej mieszaninę różnych składników i często są zanieczyszczone. Wykorzystywanie tych odpadów ma jednak długą tradycję. Już w XVIII wieku Anzelm Baum w Wielkiej Brytanii założył pierwsze przedsiębiorstwo zajmujące się na dużą skalę skupem i sprzedażą makulatury. Na terenach Polski w 1777 roku wydano rozporządzenie zakazujące wywożenia i sprzedawania poza krajem odpadów włókienniczych, papierowych, wiór, skrawków skór, a także owczych nóg i innych surowców nadających się do wytwarzania kleju [39].

Na szerszą skalę zaczęto wykorzystywać odpady w latach siedemdziesiątych 20. wieku. Bodźcem do działań w tym zakresie stał się kryzys energetyczny powodujący gwałtowne wzrosty cen paliw, surowców i energii. Równocześnie postęp techniki i nauki umożliwił efektywniejsze wykorzystanie surowców wtórnych. W ostatnich latach w krajach wysoko rozwiniętych tempo wzrostu zużycia surowców wtórnych wyprzedza tempo wzrostu zużycia surowców pierwotnych. Duże osiągnięcia w tym zakresie ma Japonia, Niemcy, Francja, Holandia, Stany Zjednoczone, oraz Wielka Brytania.

W Polsce również w ostatnich latach opracowano i wdrożono kilkadziesiąt technologii wykorzystania odpadów przemysłowych jako substytutu części lub całości surowców naturalnych. Są to technologie produkcji np. [47]:

- kruszyw i materiałów budowlanych,
- kruszyw do robót inżynieryjnych i drogownictwa,
- kruszyw do podsadzki wyrobisk podziemnych,

- wypełniaczy mineralnych dla różnych gałęzi przemysłu, pigmentów ceramicznych,
- odzysku metali nieżelaznych różnymi metodami,
- odzysku licznych substancji chemicznych,
- nawozów dla rolnictwa, środków do odkwaszania gleb,
- pasz dla zwierząt hodowlanych, tłuszczów technicznych,
- olejów przepracowanych,
- mas celulozowych, kompostu.

Każdy nie zagospodarowany i nie mający określonego przeznaczenia produkt (surowiec, materiał, produkt finalny) nabywa właściwości odpadu. Każdy odpad staje się surowcem (albo zasobem surowcowym) lub materiałem z chwilą jego zagospodarowania (a także przeznaczeniem do zagospodarowania). Każda zatem materia (substancja) pozyskiwana, przetwarzana i przemieszczana przez człowieka może być zasobem i produktem użytecznym lub odpadem o różnej uciążliwości dla otoczenia. W przyrodzie nie ma, a człowiek nie wytwarza ani jednej takiej substancji, która miałaby wyłącznie właściwości odpadu i nie można by uczynić zeń surowca.

Powstawanie odpadów powinno być eliminowane lub ograniczane przez wytwarzających odpady i odbiorców odpadów niezależnie od stopnia uciążliwości bądź zagrożeń dla życia lub zdrowia ludzi oraz dla środowiska, a także niezależnie od ich ilości lub miejsca powstawania. Działania powodujące lub mogące powodować powstawanie odpadów powinny być planowane, projektowane i prowadzone tak, aby [40]:

- zapobiegały powstawaniu odpadów;
- zapewniały bezpieczne dla środowiska wykorzystywanie odpadów, jeżeli nie udało się zapobiec ich powstaniu;
- zapewniały zgodny z zasadami ochrony środowiska sposób postępowania z odpadami, których powstaniu nie udało się zapobiec lub nie udało się wykorzystać.

Wytwarzający odpady jest obowiązany do stosowania takich sposobów produkcji i form usług lub wykorzystywania surowców i materiałów, które zapobiegają powstawaniu odpadów albo pozwalają utrzymać na możliwie najniższym poziomie ich ilość, a także zmniejszają uciążliwość bądź zagrożenie odpadów dla życia lub zdrowia oraz dla środowiska.

Ważnym elementem polityki ekologicznej państwa, najbardziej zintegrowanym z gospodarką, który nie uzyskał dotychczas właściwej rangi jest racjonalne użytkowanie, unieszkodliwianie i składowanie odpadów. Przeciwdziałanie powstawaniu odpadów sprowadza się w zasadzie do konsekwentnej realizacji dwóch podstawowych zadań:

- ograniczania powstawania odpadów przez optymalne przetwórstwo surowców, materiałów i paliw oraz użytkowanie wyrobów,
- zwiększania (maksymalizacja) stopnia wykorzystania odpadów, których powstawania na obecnym poziomie techniki i technologii nie da się uniknąć, a także sukcesywne przetwarzanie odpadów nagromadzonych w poprzednich latach.

Odpady, których nie można racjonalnie wykorzystać, z uwagi na ich ilość, brak metod i środków lub opłacalnych technologii, muszą być składowane w sposób selektywny i bezpieczny dla środowiska. Odpady stwarzające szczególne zagrożenia dla człowieka i środowiska powinny być, w przypadku niemożliwości ich zagospodarowania, unieszkodliwiane metodami, które wtórnie nie zanieczyszczają środowiska. Minimalizacji masy wytwarzanych odpadów do poziomu zapewniającego równowagę surowcową, ekologiczną i sanitarną nie da się osiągnąć bez daleko idących synchronizacji technologii i sposobu bytowania ludzi z kształtowaniem i funkcjonowaniem ekologicznej struktury na określonym terenie.

Doświadczenia krajów najbardziej zaawansowanych w ochronie środowiska wykazują, że minimalizacja wytwarzania odpadów „u źródła" jest najbardziej efektywną strategią w gospodarce odpadami. Pomniejszenie ilości wytwarzanych odpadów przynosi bowiem wymierne korzyści ekonomiczne podnosząc efektywność procesów technologicznych, pobudzając rozwój techniki i organizacji w zakładzie, obniżając koszty związane z transportem, unieszkodliwianiem i składowaniem odpadów.

Minimalizacja odpadów określana jest głównie jako redukcja wytwarzania odpadów u źródła lub wykorzystanie surowców. Dla skutecznej redukcji odpadów niezbędna jest znajomość [40]:

- źródeł, warunków i wielkości wytwarzanych odpadów;
- ich właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych;
- powodowanego przez nie ekotoksykologicznego zagrożenia;
- technologicznych i ekonomicznych możliwości utylizacji odpadów;
- możliwości transformacji odpadów do postaci o mniejszej uciążliwości;
- przyrodniczo-technicznych uwarunkowań składowania odpadów.

Przedsięwzięcia zmierzające do zmniejszenia ilości powstających i gromadzonych w środowisku odpadów powinny obejmować:

- redukcję wytwarzania „u źródła",
- wykorzystanie odpadów w miejscu powstawania,
- wykorzystanie odpadów poza miejscem powstawania,
- modyfikację urządzeń i technologii.

Przedmiotem wykorzystania są takie odpady jak: złom metali, stłuczka szklana, makulatura, wycofane z eksploatacji wszelkie wyroby, budowle, urządzenia, maszyny, środki transportu, wybrakowane wyroby nie nadające się do użytku itp. W przypadku braku możliwości zużycia odpadów pożytkowych jako surowca wtórnego do wytwarzania wyrobu analogicznego do tego z którego pochodzą, wówczas przeznacza się je do wytwarzania innych produktów. Na przykład, jeśli odzyskane włókna z pończoch pożytkowych nie nadają się do wytwarzania nowego podobnego wyrobu, to wykorzystuje się je do produkcji innych włóknin bądź metodą pirolizy przerabia się na surowce pierwotne. Wykorzystanie odpadów z wyeksploatowanych wyrobów pożytkowych może się odbywać przez [39]:

- ponowne wielokrotne użycie produktu do spełnienia funkcji jak w cyklu pierwszym, po dodatkowym procesie uzdatniającym (np. regeneracja części zamiennych);
- wtórne wykorzystanie surowca bez zmiany jego składu i stanu do wytworzenia nowych produktów (np. wykorzystanie makulatury do wytwarzania papieru, stłuczki szklanej do wytwarzania różnych wyrobów szklanych, złomu metali do wykonania nowych odlewów żeliwnych);
- wykorzystanie surowca wtórnego połączone ze zmianą jego stanu i składu (np. przetwórstwo odpadów komunalnych na gaz energetyczny, spalanie opon samochodowych w celu wykorzystania energii, wykorzystanie drewna z rozbiórki i opakowań do wytwarzania płyt drewnopodobnych itp.).

Wykorzystanie odpadów obejmuje trzy fazy:

- pozyskiwania,
- uzdatniania,
- użytkowania.

Pozyskiwanie surowców wtórnych z różnych odpadów realizuje się przez:

- skup od ludności, warsztatów rzemieślniczych, różnych jednostek gospodarczych oraz organizacji społecznych;
- selektywną zbiórkę odpadów do wielokomorowych pojemników;
- społeczną zbiórkę od ludności, instytucji itp.;
- wyselekcjonowanie określonych surowców wtórnych ze zgromadzonych odpadów komunalnych;
- łączne wykorzystanie wszystkich zgromadzonych rodzajów odpadów.

Wybór jednej z podanych wyżej form pozyskiwania odpadów zależy między innymi od:

- źródeł odpadów,
- przeznaczenia pozyskiwanych odpadów,
- zawartości składników użytkowych w odpadach,

- dostępności niezbędnych urządzeń do sortowania i przerobu odpadów,
- możliwości zbytu odzyskiwanych rodzajów surowców wtórnych,
- sprawności działania jednostek pozyskujących i przetwarzających surowce wtórne,
- aktywności społecznej mieszkańców.

Odpady zawierają składniki, które mogą być wydzielone i wykorzystane jako surowce wtórne podstawowe, wyjściowe do tworzenia nowych materiałów czy wyrobów, pasz dla zwierząt, jako energia cieplna itp. Uzdatnianie obejmuje różne operacje, a mianowicie: segregowanie, czyszczenie, rozdrabnianie, granulowanie, przetapianie itp. Segregowanie ma na celu wydzielenie z całej masy odpadów poszczególnych asortymentów i klas o identycznych bądź zbliżonych cechach (parametrach) [39]. Czyszczenie surowców wtórnych pozyskiwanych z odpadów dokonuje się w różnych procesach, jak np. trzepanie, pranie, mycie itp. Dalsze operacje uszlachetniające są zróżnicowane zależnie od rodzaju pozyskiwanych surowców i wykonywane są w procesach mechanicznych, chemicznych, termicznych, biochemicznych itp. W rezultacie tych operacji uzdatniających bądź regeneracyjnych umożliwia się wykorzystanie znacznie większej masy odpadów.

W niektórych procesach przetwórczych, zwłaszcza chemicznych i biologicznych, w wyniku różnych reakcji, powstają przetworzone odpady, które odznaczają się nową jakością, nowymi związkami. Te nowe związki mają również określone cechy, które mogą być wykorzystane do wytworzenia innych wyrobów. Warunkiem wykorzystania tych surowców jest znalezienie właściwego kierunku wykorzystania i opracowanie odpowiedniego procesu technologicznego. Współczesne osiągnięcia nauki i techniki pozwalają na przerób i wykorzystanie wszelkich odpadów przez ich regenerację, odzyskanie poszczególnych związków, wykorzystanie energii cieplnej powstającej podczas spalania itp.

Przekształcenie odpadów w surowce wtórne jest nierozerwalną częścią składową rozszerzonej reprodukcji przedmiotów pracy i często wiąże się z odpowiednim uzdatnianiem. To przekształcenie dokonuje się w obiegach zamkniętych materiałów (wewnątrzzakładowych) lub w obiegach otwartych obejmujących kilka jednostek gospodarczych.

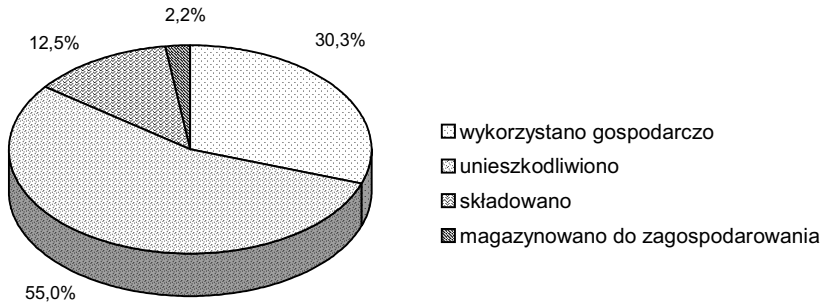
Unieszkodliwianie odpadów niebezpiecznych

Odpady niebezpieczne pochodzą głównie z przemysłu, ale także z rolnictwa, transportu, służby zdrowia i laboratoriów badawczych. Również do tej grupy zalicza się część odpadów komunalnych. Posiadają one określone cechy, wyróżniające je od innych odpadów [39], a mianowicie:

- palność (podatność odpadów do zapłonu i palenia się trwałym i silnym płomieniem);

- korozyjność (niszczenie materiałów konstrukcyjnych);
- reaktywność (zdolność do krótkoterminowych działań polegających na eksplozji, wydzielaniu toksycznych gazów, reakcji chemicznych pomiędzy odpadami a środowiskiem);
- ekotoksyczność (zdolność do działań jak wyżej, ale powolnych i długoterminowych).

Według Raportu Inspekcji Ochrony Środowiska [38] ilość odpadów niebezpiecznych wytworzonych w Polsce w 2001 r. wynosiła ok. 1,3 mln ton. Z podanej ilości wykorzystano gospodarczo – 30,3%, unieszkodliwiono – 55,0%, a składowano – 12,5% (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Struktura zagospodarowania odpadów niebezpiecznych w 2001 r. [38]

Unieszkodliwianie odpadów niebezpiecznych polega na postępowaniu, którego efektem będzie eliminacja zawartych w nich szkodliwych i toksycznych składników. Określone związki chemiczne lub ich mieszaniny mogą być eliminowane przez rozkład na związki nieszkodliwe i nietoksyczne, w wyniku których powstaną substancje nie stwarzające już zagrożenia dla człowieka i środowiska naturalnego. Sposób unieszkodliwiania jest dobierany według właściwości utylizowanej substancji. Tak więc, grupa drobnoziarnistych odpadów metalowych może być unieszkodliwiana w identycznych warunkach. Dla większości odpadów niebezpiecznych dostępne są już bezpieczne technologie utylizacji [3, 9, 26, 33], a mianowicie:

- odzysk i powtórne wykorzystanie z użyciem metod rozdzielania grawitacyjnego, filtracji, destylacji i innych metod separacji;
- unieszkodliwianie metodami fizyko-chemicznymi;
- unieszkodliwianie metodami biologicznymi;
- scalanie oraz zestalanie;
- izolowanie – tymczasowe zamykanie w szczelnych pojemnikach.

Nadal jedną z metod pozbywania się odpadów niebezpiecznych jest ich składowanie, które odbywa się w miejscu i w sposób wskazany przez administrację terenową, z uwzględnieniem późniejszej rekultywacji terenu.

Do grupy odpadów niebezpiecznych zaliczane są również drobnoziarniste metalowe odpady przemysłowe powstające podczas obróbki wykańczającej wyrobów, np. szlifowanie, o ile zawierają w swoim składzie substancje toksyczne będące na urzędowej liście trucizn. W przypadku tych odpadów aktualne przepisy prawne zakazują składowania, a nakazują ich przetworzenie w celu powtórnego wykorzystania.

Sposoby wykorzystania metalonośnych odpadów drobnoziarnistych

Główne źródła metalonośnych odpadów drobnoziarnistych to:

- popioły i żużle energetyczne,
- odpady z obróbki powierzchniowej metali.

Największą grupę odpadów zawierającą metalowe frakcje drobnoziarniste stanowią popioły i żużle energetyczne. Zagospodarowanie tych odpadów prowadzone jest w trzech podstawowych kierunkach:

- przemysłowe wykorzystanie jako surowca wtórnego;
- wykorzystanie do niwelacji terenu, rekultywacji, wypełniania podziemnych wyrobisk itp.;
- wykorzystanie do składowania skojarzonego, np. składowanie odpadów węglowych wspólnie z odpadami energetycznymi, co zapobiega samozapaleniu hałd.

Odpady drobnoziarniste przeznaczone do zagospodarowania należy odpowiednio przygotować. Znane są takie technologie jak: suspensji tiksotropowej (nazywana również emulgowaniem), spiekania, granulowania oraz brykietowania [7, 8, 15, 23, 29]. Jako surowce wtórne popioły i żużle energetyczne najczęściej stosowane są do produkcji:

- ceramiki budowlanej jako komponent masy ceramicznej w ilości do 70% wag. – aktualnie wykorzystuje się w zakładach ceramiki budowlanej średnio rocznie 250–300 tys. ton popiołów lotnych;
- betonów – jako wypełniacze mineralne betonów zwykłych, izolacyjno-konstrukcyjnych i zbrojonych (żużle) oraz jako mikrowypełniacze betonów lekkich i izolacyjno-konstrukcyjnych (popioły);
- betonów komórkowych (siporeks);
- cementu – jako surowiec podstawowy lub jako dodatek – łącznie do produkcji cementu wykorzystuje się ok. 500–700 tys. ton odpadów rocznie;
- zasypek i pudrów odlewniczych;

- tworzywa ceramicznego z odpowiednią wstępną obróbką popiołów polegającą na spiekaniu z NaOH – takie tworzywo ceramiczne odznacza się bardzo dobrymi parametrami termicznymi i ma zastosowanie do produkcji wyrobów o podwyższonej odporności termicznej np. zbiorników ceramicznych do ogrzewania wody, kaset do wypalania ceramicznych płytek okładzinowych itp.
- spoiwa hydraulicznego – możliwość wykorzystania ponad 2 mln Mg popiołów lotnych rocznie.

Znaczna ilość metalonośnych odpadów drobnoziarnistych powstaje również podczas obróbki powierzchniowej metali – w operacji zdzierania, szlifowania i dogładzania. Po odpowiednim przygotowaniu odpady te mogą być wykorzystane jako [1, 4, 27]:

1. Surowiec do produkcji klinkieru portlandzkiego. Klinkier portlandzki stanowi półprodukt, z którego wytwarza się cement. W większości cementowni produkuje się go metodą suchą. Odpady poszlifierskie muszą być wcześniej odwodnione i wysuszone, co wymaga dodatkowych nakładów finansowych. Rygorystyczne są wymagania dotyczące dopuszczalnej ilości chromu w klinkierze – mieszanka stosowanych do jego produkcji surowców nie może zawierać więcej niż 2 mg chromu w kilogramie materiału.
2. Dodatek do mieszanek mineralno-asfaltowych, które stosowane są w budownictwie drogowym. Koncepcja ta wymaga jednak potwierdzenia w badaniach eksperymentalnych. Ich celem powinno być określenie niektórych właściwości odpadów poszlifierskich np. kształtu ziaren, porowatości, nasiąkliwości, mrozoodporności, ścieralności, reaktywności alkalicznej, zawartości siarki, a następnie porównanie ich z wymaganiami. Należy podkreślić, że producenci mieszanek mineralno-asfaltowych mają do dyspozycji wiele sprawdzonych wypełniaczy.
3. Proszek stosowany w metalurgii proszków do wytwarzania gotowych elementów. Odpady wymagają jednak skomplikowanego przygotowania. Polega ono na: odolejeniu odpadu, rozdziale szlamu na dwie frakcje zawierające metal lub ścierniwo, dekantacji i niskotemperaturowym suszeniu koncentratu metalu oraz jego magnetycznym wzbogaceniu. Niezbędne jest także rozdrobnienie materiału w celu uzyskania wymaganego składu ziarnowego. Badania, które prowadzono w Polsce wykazały [35], że wzbogacony koncentrat zawiera ponad 93% metalu. Zatem zanieczyszczenie materiału głównie ścierniwem uniemożliwia stosowanie koncentratu w metalurgii proszków.
4. Komponent wsadu pieców hutniczych. Z uwagi na zanieczyszczenia powinny one być kierowane do wielkiego pieca lub pieców stalowniczych, w których następuje wypalanie niepożądanych domieszek. W przypadku gdy odpadowy materiał zawiera dużo żelaza odpowiednim urządzeniem do jego utylizacji jest łukowy piec elektryczny lub konwertor.

Wykorzystanie odpadów drobnoziarnistych w celach niehutniczych

Jednym ze sposobów wykorzystania odpadu metalonośnego w celach innych niż cele hutnicze jest zestalenie go spoiwami mineralnymi, a przede wszystkim cementem [20, 32]. Sposób ten nie wymaga dużych nakładów inwestycyjnych, może być prowadzony w każdym zakładzie produkującym betonowe elementy budowlane. Metoda jest prosta i nie energochłonna. W celu polepszenia związania cementu lub uzyskania lepszych właściwości betonów można stosować różnego typu dodatki. Utwardzony odpad może być wykorzystany w budownictwie do produkcji elementów budowlanych. Zmniejsza on zużycie cementu lub kruszywa, jednocześnie poprawiając właściwości betonów.

Zestalony odpad może być też stosowany jako kruszywo do niwelacji terenu w drogownictwie. Technologia produkcji jest stosunkowo prosta i tania, może być stosowana w każdym zakładzie produkującym materiały budowlane [22].

Wykorzystanie drobnoziarnistego odpadu metalonośnego w budownictwie wymaga jednak przeprowadzenia wielu szczegółowych badań oddziaływania na środowisko. Ponadto w tej technologii utylizacji tracone są cenne pierwiastki metaliczne.

Prowadzone były też próby wykorzystania odpadów poszlifierskich jako komponentu do produkcji mas formierskich oraz ocieplających płyt wlewnicowych stosowanych w hutnictwie w procesie odlewania stali w halach wlewniczych. Jednak ze względów ekonomicznych zaniechano wdrożenia tych prób do produkcji [23].

Wykorzystanie odpadów drobnoziarnistych w celach hutniczych

Wykorzystanie drobnoziarnistego odpadu metalonośnego do przetopienia w piecach hutniczych jest często stosowaną i efektywną metodą ich utylizacji. Podstawowym warunkiem jest nadanie temu odpadowi postaci kawałkowej. Ponadto skawałkowany odpad powinien posiadać określoną odporność mechaniczną i nie zawierać dodatków uciążliwych dla przebiegu procesów hutniczych. Powszechnie stosowaną w kraju metodą nadawania postaci kawałkowej jest scalanie [2, 5, 10, 19, 34, 36]. Scalanie materiałów drobnoziarnistych może następować poprzez:

- spiekanie,
- grudkowanie,
- brykietowanie.

Spiekanie jest najprostszą metodą scalania, lecz na ogół uciążliwą dla otoczenia. Istnieją też pewne ograniczenia w jej stosowaniu. Nie poddaje się spiekaniu paliw oraz takich materiałów, których prażenie powoduje niepożądaną zmianę składu chemicznego.

Grudkowanie wymaga dużego stopnia rozdrobnienia ośrodka sypkiego oraz utrzymania na stałym poziomie jego wilgotności. Żądaną wytrzymałość mechaniczną grudek uzyskuje się dzięki stosowaniu środka wiążącego. Często niezbędne jest także ich suszenie lub prażenie. Grudki posiadają porowatą strukturę i stosunkowo niewielką średnicę.

Przeprowadzone laboratoryjne badania nad grudkowaniem odpadów pochodzących z przemysłu maszynowego, zawierających relatywnie dużą ilość żelaza, pozwoliły uzyskać materiały nadające się do recyklingu [21]. Grudkowanie odpadów prowadzono przy wykorzystaniu prototypowego urządzenia w postaci rynnowego grudkownika wibracyjnego. Jako środek wiążący zastosowano wapno hydratyzowane.

Efektywny sposób scalania stanowi brykietowanie [6, 11, 13, 16, 18]. Konkuruje ono z powodzeniem ze spiekaniem i grudkowaniem. Istotą brykietowania jest to, że w wyniku wywierania nacisku na materiał drobnoziarnisty następuje jego zagęszczanie, polegające m.in. na wzajemnym zbliżaniu ziaren. Dzięki temu mogą ulec wzmocnieniu lub powstać wiązania o różnym charakterze. Poprzez brykietowanie otrzymuje się zagęszczony i jednocześnie zbrylony materiał drobnoziarnisty, o żądanym kształcie i wymiarach oraz określonej wytrzymałości mechanicznej. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że brykietowanie jest odpowiednią metodą scalania wielu uciążliwych dla środowiska naturalnego metalowych odpadów produkcyjnych. Potwierdzają to przykłady następujących krajowych technologii wytwarzania brykietów:

1. Wytwarzanie brykietów krzemowo-magnezowych z odpadowych drobnych frakcji żelazokrzemu oraz wiórów magnezowych z obróbki mechanicznej z przemysłu lotniczego. Technologia opracowana na Politechnice Śląskiej polega na wykorzystaniu brykietów krzemowo-magnezowych do sferoidyzacji grafitu w żeliwie. Brykiety można wytwarzać z odpadowych drobnych frakcji żelazokrzemu (poniżej 3 mm) oraz wiórów magnezowych z obróbki mechanicznej z przemysłu lotniczego. Jako lepiszcze stosuje się szkło wodne, cement oraz pak i lepiszcza organiczne.
2. Próby przemysłowe brykietowania koncentratów miedzi [28]. Do brykietowania zastosowano lepiszcze skrobiowe pod nazwą EKOLEP produkowane przez Z.Ch. Złotniki. Stwierdzono przydatność lepiszcza skrobiowego do brykietowania koncentratów miedzi. Siła wiążąca lepiszcza skrobiowego zależy od rodzaju stosowanego surowca oraz parametrów technologicznych jego wytwarzania.
3. Opracowanie technologii brykietowania pyłów stalowniczych pochodzących z elektrycznych pieców łukowych [37]. Przeprowadzono w Instytucie Metali Nieżelaznych (Gliwice) laboratoryjne próby brykietowania pyłów stalowniczych z elektrycznych pieców łukowych z ługiem posiarczanowym i szkłem wodnym sodowym jako lepiszczami. Stwierdzono, że ług posiarczynowy

jest lepiszczem przy pomocy którego można brykietować pyły stalownicze otrzymując brykiety o odpowiedniej wytrzymałości.

4. Próby brykietowania w prasie walcowej mieszanki odpadów technologicznych z FŁT „Iskra" przeprowadzone w AGH w Krakowie [27]. Zawierają one olej, którego dodatek uniemożliwia scalanie tego materiału drobnoziarnistego w prasie walcowej. Dlatego konieczna była neutralizacja oleju, np. za pomocą wodorotlenku wapnia. Wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły możliwość brykietowania w prasie walcowej mieszanki odpadów technologicznych z FŁT „Iskra" i wapna hydratyzowanego. Otrzymywane brykiety posiadały zbyt niską wytrzymałość mechaniczną. Zdecydowano się na zastosowanie lepiszcza w postaci karboksymetylocelulozy. Uzyskano brykiety o wyższej wytrzymałości mechanicznej pozwalającej na wykorzystanie ich w celach hutniczych.

Badania procesu brykietowania różnego rodzaju metalonośnych frakcji odpadowych w celu ich hutniczej utylizacji są nadal kontynuowane, a wiodącym krajowym ośrodkiem jest Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, gdzie opracowano m.in. następujące technologie [12, 14, 17, 25]:

- otrzymywanie w prasie walcowej własnej konstrukcji brykietów ze szlamu zgorzelinowo-zendrowego,
- wytwarzanie w prasie walcowej brykietów z tlenkowych odpadów żelazonośnych,
- otrzymywanie w prasie walcowej brykietów z odpadowego tlenku cynku,
- wytwarzanie w prasie walcowej brykietów z wiórów stopów łożyskowych,
- otrzymywanie w wibracyjnej prasie stemplowej własnej konstrukcji brykietów z wiórów stopów miedzi.

Wynika stąd, że brykietowanie metalowych materiałów drobnoziarnistych jako metoda scalania frakcji jest dobrze znana i powszechnie stosowana.

1.3. Specyfika przemysłowych odpadów drobnoziarnistych i technologie ich utylizacji

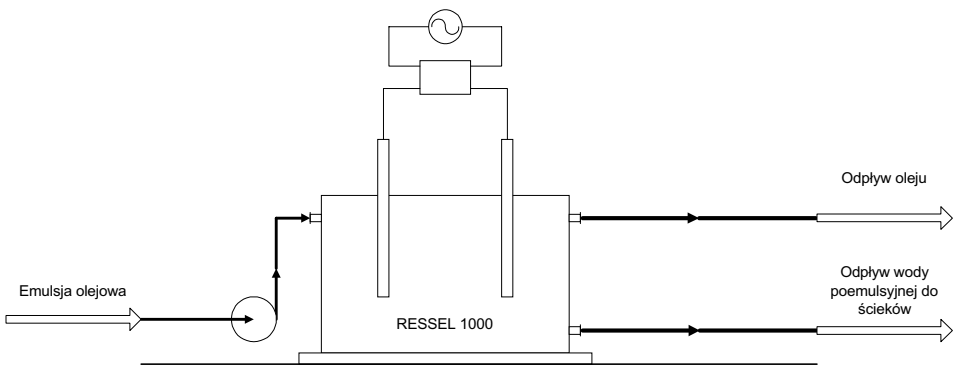
Przemysłowe odpady drobnoziarniste występują często w postaci zanieczyszczonych emulsji i szlamów. Główne zanieczyszczenia stanowią oleje, smary oraz metale i ich związki. Po usunięciu nadmiaru wody odpady gromadzone są w kontenerach lub na poletkach składowych. Podczas składowania zachodzi proces samoistnego dosuszania w naturalnych warunkach atmosferycznych. Jednocześnie stopniowo, w miarę ubywania wilgoci, odpady mogą ulegać zbryleniu oraz skorodowaniu.

O szkodliwości tej kategorii odpadów decyduje obecność substancji toksycznej będącej na urzędowej liście trucizn. Przykładami takich substancji są: rtęć, kadm, ołów, chrom, arsen, azbest itp. Ich szkodliwość dla człowieka przejawia się w ostrych zatruciach i alergich, w większych stężeniach wykazują działanie rakotwórcze.

Do unieszkodliwiania metalonośnych odpadów drobnoziarnistych można zastosować procesy fizyczne oraz chemiczne. Podstawowe procesy fizyczne to: filtracja, ultrafiltracja, flotacja, flokulacja, elektrokoagulacja, osmoza, ekstrakcja, mieszanie, zagęszczanie, sedymentacja, rozdrabnianie, odwirowanie, adsorpcja, desorpcja, stapianie, wymrażanie, suszenie i destylacja. Najczęściej zaś stosowane procesy chemiczne to: wymiana jonowa, neutralizacja, utlenianie, hydroliza, strącanie, przemiana katalityczna, elektroliza, absorpcja i cementacja [30]. Wyboru określonego sposobu unieszkodliwiania odpadów należy dokonać na podstawie ich szczegółowych właściwości. Poniżej przedstawiono przykłady stosowanych w Polsce technologii do unieszkodliwienia niektórych rodzajów odpadów drobnoziarnistych.

Instalacja do elektrostatyczno-elektrolitycznego rozbijania emulsji

Instalacja przeznaczona jest do unieszkodliwiania zanieczyszczonych olejem emulsji chłodząco-smarujących z procesu obróbki skrawaniem metali [30]. Schemat technologiczny instalacji przedstawiono na rysunku 1.3. Wynikiem jej zastosowania jest odzysk oleju oraz oddzielenie drobnoziarnistej frakcji metalowej. Do unieszkodliwiania emulsji wykorzystuje się urządzenie RESEL 1000, którego głównym elementem jest reaktor (elektrolizer) wraz z osprzętem. Wewnątrz tego reaktora zamontowane są elektrody o specjalnym składzie chemicznym.

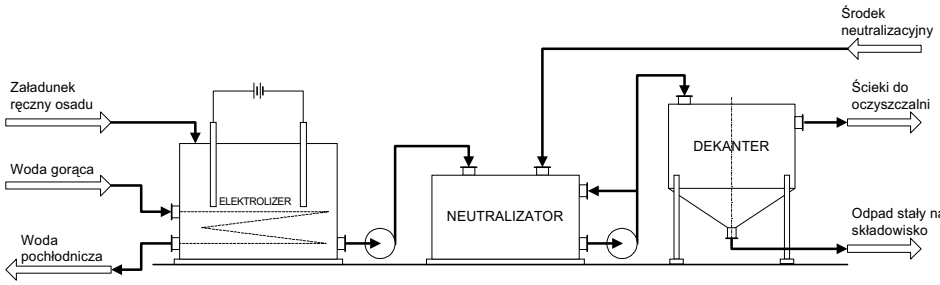


Rys. 1.3. Schemat technologiczny instalacji do elektrostatyczno-elektrolitycznego rozbijania emulsji [30]

W przedstawionej metodzie unieszkodliwiania wykorzystuje się zjawisko osadzania zjonizowanych w polu elektrostatycznym kropelek na powierzchniach elektrod oraz procesy koagulacji i absorpcji. Absorpcję i koagulację wywołują związki chemiczne, które powstają w procesie elektrolizy z materiału elektrod, oraz ze związków, które zawarte są w fazie wodnej emulsji. Oddzielając się od fazy wodnej, na powierzchnię wypływa olej nasycony powstającymi w trakcie elektrolizy wody gazami – tlenem i wodorem. Proces deemulgacji trwa, w zależności od ilości i rodzaju emulsji, od 1 do 7 godzin. Z uwagi na wydzielanie się wodoru i tlenu, które tworzą mieszaninę wybuchową, pomieszczenie elektrolizera musi spełniać odpowiednie wymogi BHP. Powyższa technologia została opracowana przez Instytut Obróbki Skrawaniem w Krakowie.

Instalacja do unieszkodliwiania szlamów pogalwanicznych

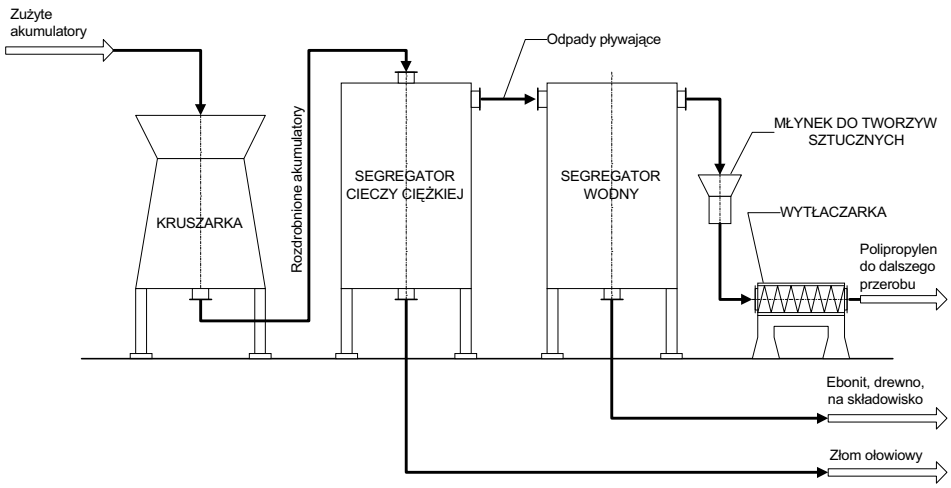
Instalacja służy do unieszkodliwiania szlamów pogalwanicznych powstałych w procesie elektrolitycznego cynkowania elementów stalowych [30]. Schemat technologiczny instalacji przedstawiono na rysunku 1.4. Szlamy, w skład których wchodzą m.in. cyjanek cynku i siarczek cynku, unieszkodliwiane są w wannie z blachy stalowej, wyłożonej ebonitem. Proces elektrolizy przebiega w środowisku wodnym w temperaturze 60–71°C przy napięciu prądu 6 V. Tlen wydzielający się na anodzie utlenia cyjanki do dwutlenku węgla z równoczesnym wydzielaniem azotu oraz siarczku do siarczanów. Na katodzie osadzają się metale. Proces neutralizacji trwa ok. 8 godzin. Po rozkładzie cyjanków powstała kąpiel elektrolityczna kierowana jest do zbiornika, w którym następuje korekta pH do wartości 7,5–8,2, a następnie kieruje się ją do oczyszczalni ścieków. Metale wydzielone w postaci gąbczastej na stalowej katodzie należy zeskrobać, a następnie odstawić do zbiornika odpadów wtórnych. W podobny sposób można unieszkodliwiać inne osady pogalwaniczne, np. z nawęglania i cyjanowania.



Rys. 1.4. Schemat technologiczny instalacji do unieszkodliwiania szlamów pogalwanicznych [30]

Instalacja do odzysku złomu akumulatorowego

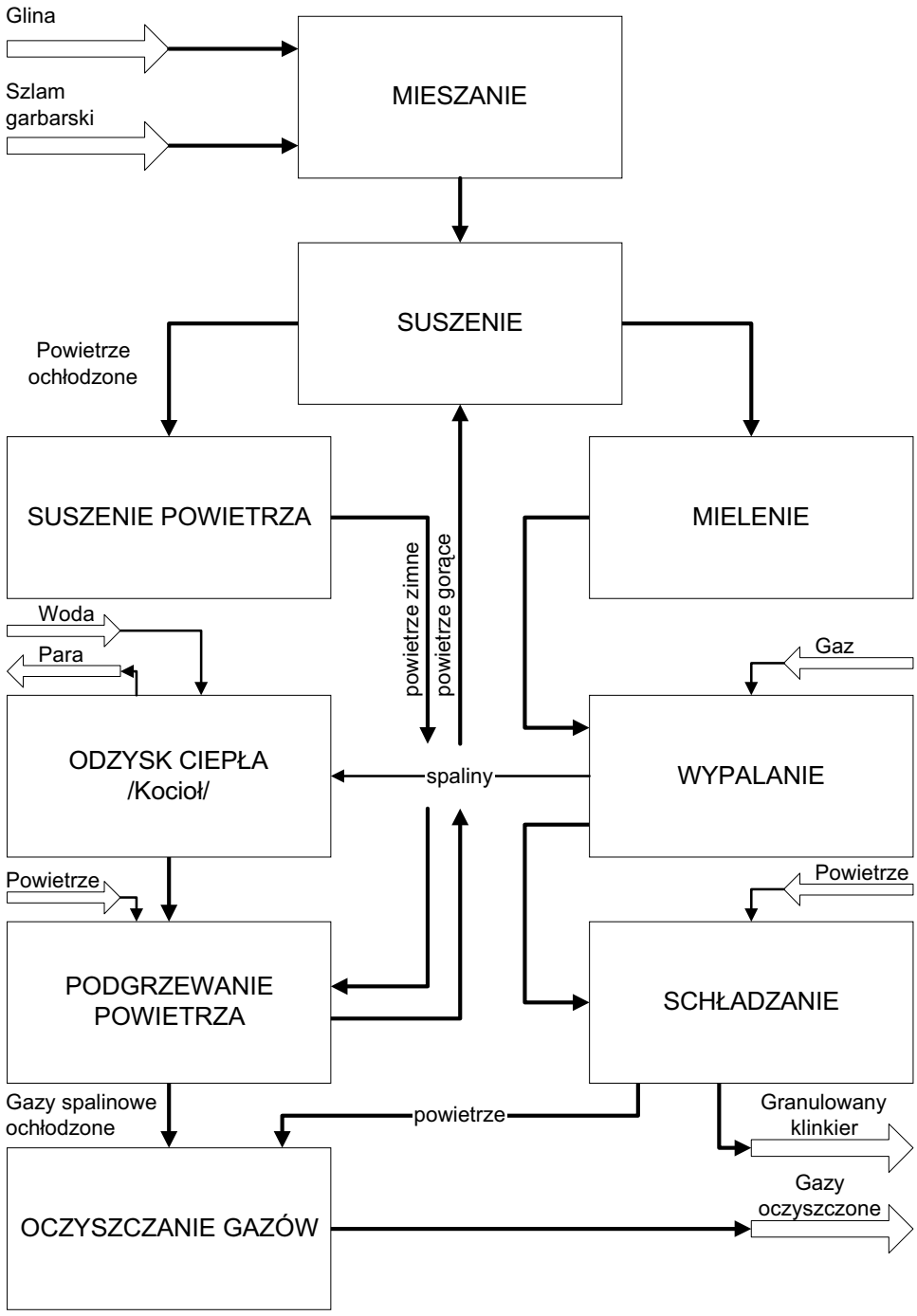
Akumulatory ołowiowe pozbawione elektrolitu – kwasu siarkowego – kieruje się na kruszarkę, która rozdrabnia akumulatory na kawałki o wymiarach poniżej 100 mm [30]. Po rozdrobnieniu materiał akumulatorowy transportowany jest taśmociągiem i transportem hydraulicznym do segregatora. Zadaniem segregatora jest oddzielenie fazy metalicznej od fazy organicznej w postaci emulsji. Emulsja ta poddawana jest wtórnej segregacji w środowisku wodnym na polipropylen i pozostałe zanieczyszczenia. Wydzielony polipropylen kierowany jest do kruszarki nożowo-wirnikowej zaopatrzonej w segregator powietrzny (wialnię). Fazę polipropylenową kieruje się następnie do wytłaczarki w celu otrzymania granulatu, który kierowany jest do odbiorcy – producenta obudów akumulatorowych. Faza metaliczna zawierająca głównie ołów, a także frakcja szlamowata – siarczanowa pasta z osadników do sedymentacji – kierowana jest do dalszego przerobu celem odzyskania ołowiu. Odpadowa frakcja ebonitowa natomiast, składowana jest na składowisku. Technologię procesu opracował Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach, natomiast projekt techniczny „Bipromet" w Katowicach. Schemat technologiczny instalacji przedstawiono na rysunku 1.5.



Rys. 1.5. Schemat technologiczny instalacji do odzysku złomu akumulatorowego [30]

Metoda utylizacji szlamów garbarskich

Szlamy garbarskie powstają w procesie garbowania skór i zawierają m.in. szkodliwy dla człowieka chrom. Technologia utylizacji tych szlamów polega na termicznej ich obróbce w instalacji wybudowanej przez niemiecką firmę



Rys. 1.6. Schemat procesu utylizacji szlamów garbarskich [30]

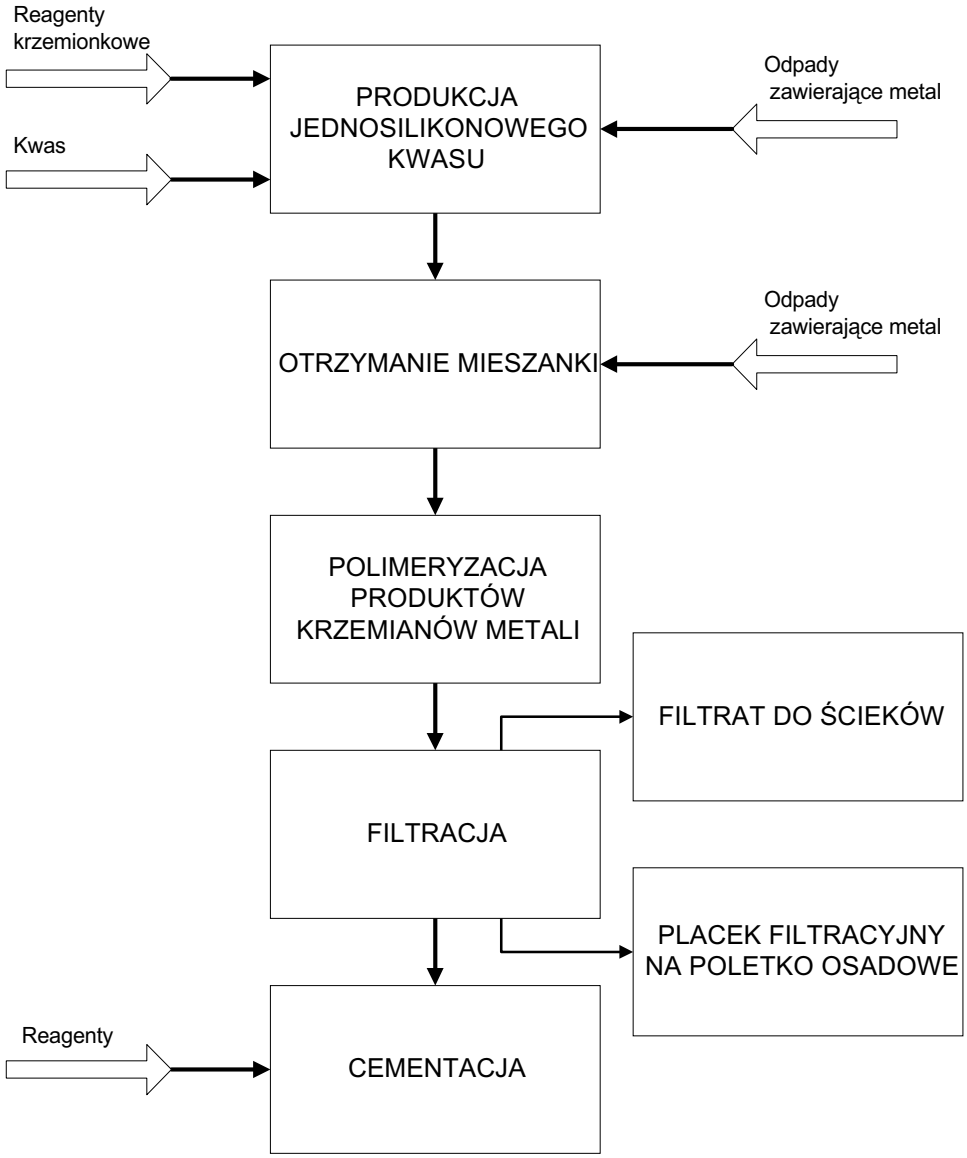
Kettenbauer Germany International [30]. Produktem końcowym jest materiał obojętny – granulowany klinkier. Przebieg procesu utylizacji przedstawiono na rysunku 1.6. W procesie tym do szlamów garbarskich dodaję się glinę w proporcji 1:1 w stosunku do suchej masy. Mieszanina suszona jest w mieszarce taśmowej do wilgotności 15%, a następnie kierowana do młyna. Tam następuje jej rozdrobnienie do wielkości grudek poniżej 200 mg. Rozdrobnioną mieszaninę poddaje się granulacji. Granulat wypalany jest w temperaturze ok. 1200 °C w piecu obrotowym, w którym jako paliwo stosuje się gaz. Gazy spalinowe opuszczające piec obrotowy pozbawiane są części organicznej przez spalanie w komorze dopalania w temperaturze powyżej 1200 °C. Gorące gazy spalinowe z komory dopalania kierowane są do kotła odzysknicowego, w którym są schładzane, wytwarzając parę wysokociśnieniową do produkcji energii elektrycznej. W trakcie procesu wypalania granulek zawierających odpady garbarskie i glinę następuje redukcja zawartości metali ciężkich – szczególnie chromu. Pozostałe niewielkie ilości metali ciężkich wiązane są z gliną jako części ceramiczne i nie stanowią już zagrożenia dla środowiska. Po schłodzeniu do temperatury 150 °C otrzymuje się gotowy produkt – ceramiczny spiek w formie granulatu, który może być użyty jako materiał dodawany do elementów betonowych i do budowy dróg.

Technologia „Soliroc" scalania odpadów

Metoda „Soliroc" opracowana została przez niemiecką firmę Cemstobel-Esdex. Stosowana jest w 21 krajach, m.in. w Niemczech, Wielkiej Brytanii, USA, Francji, Kanadzie i we Włoszech. Jej zastosowanie jest szczególnie przydatne do przetwarzania drobnoziarnistych odpadów metalowych występujących w postaci emulsji i szlamów [30]. W Polsce technologia „Soliroc" stosowana jest w czterech instalacjach przerabiających ok. 120 000 Mg odpadów przemysłowych rocznie. Schemat technologiczny instalacji przedstawiono na rysunku 1.7. Proces utylizacji obejmuje trzy stadia obróbki odpadów:

1. Mieszanie reagentów krzemionkowych z odpadowymi kwasami celem utworzenia roztworu kwasu krzemowego.
2. Dodawanie drobnoziarnistych odpadów do roztworu kwasu krzemowego – rozpuszczenie metali zawartych w odpadach.
3. Dodawanie alkaliów w celu wytrącenia i polimeryzacji krzemianów metali.

W wyniku powyższych procesów powstaje metalonośny szlam, który następnie jest filtrowany w celu usunięcia nadmiernej zawartości wody. Po odfiltrowaniu uzyskuje się „placek" filtracyjny o znacznej spoistości zawierający odzyskane metale. Do typowych odpadów, które mogą być przerabiane metodą „Soliroc", należą:



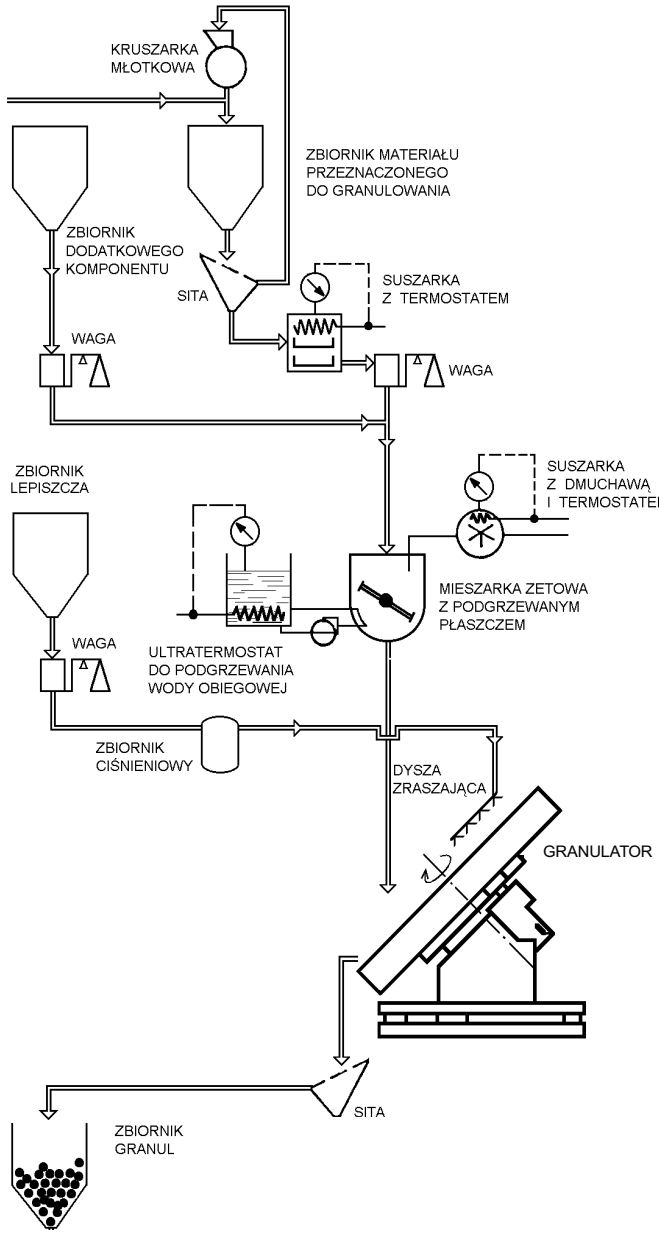
Rys. 1.7. Schemat technologiczny instalacji „SOLIROC" do scalania odpadów drobnoziarnistych [30]

- odpady galwaniczne zawierające metale ciężkie, takie jak: Zn, Cu, Cr, Cd i Ni;
- popioły ze spalania odpadów komunalnych, posiadające w swoim składzie rozpuszczalne sole ołowiu i cynku;
- odpady procesu hydrometalurgicznego produkcji metali ciężkich zawierających arsen;
- odpady organiczne.

Otrzymane produkty procesu „Soliroc" charakteryzują się parametrami porównywalnymi do betonu – niską hydrauliczną przepuszczalnością i bardzo małą wymywalnością.

Technologia granulowania szlamów konwertorowych

Technologia granulowania powstających w hutnictwie odpadowych szlamów konwertorowych (tlenkowych materiałów drobnoziarnistych) ma na celu przygotowanie tych odpadów do utylizacji w piecach stalowniczych. Linia technologiczna do granulowania tych szlamów działa na terenie Przedsiębiorstwa Materiałów Ogniotrwałych S.A. w Krakowie [26]. Służy ona do utylizacji tlenkowych odpadów żelazonośnych w konwertorach. Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 1.8. W skład instalacji wchodzi między innymi granulator talerzowy o szerokim zakresie zmian wartości parametrów procesu granulowania (m.in. prędkości obrotowej talerza i jego kąta pochylenia). Konstrukcja urządzenia pozwala na zmianę charakteru jego pracy i stosowanie go jako granulatora odśrodkowego. Istnieje także możliwość wymiany talerzy o różnych średnicach oraz usytuowania ich w pozycji poziomej. W procesie przygotowania szlamów konwertorowych dodaje się pył węglowy, zapewniający niezbędną ilość energii cieplnej, oraz odpadowe wapno palone, które jest stosowane w celu zwiększenia wytrzymałości mechanicznej granul. Z mieszanki szlamów konwertorowych, wapna palonego oraz pyłu wielkopiecowego można otrzymać granule o średnicy 8–25 mm, które nadają się do stosowania jako komponent wsadu złomowego do konwertora. Zawartość wapna nie powinna przekraczać 15% wagowych masy szlamów ponieważ może wystąpić pękanie i rozpadanie się granul podczas ich sezonowania. Wadą przedstawionego rozwiązania są wysokie koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne linii technologicznej do brykietowania szlamów konwertorowych. Istotny wpływ mają wysoka cena pyłu węglowego oraz kosztowne suszenie mieszanki w procesie jej przygotowania do granulowania.



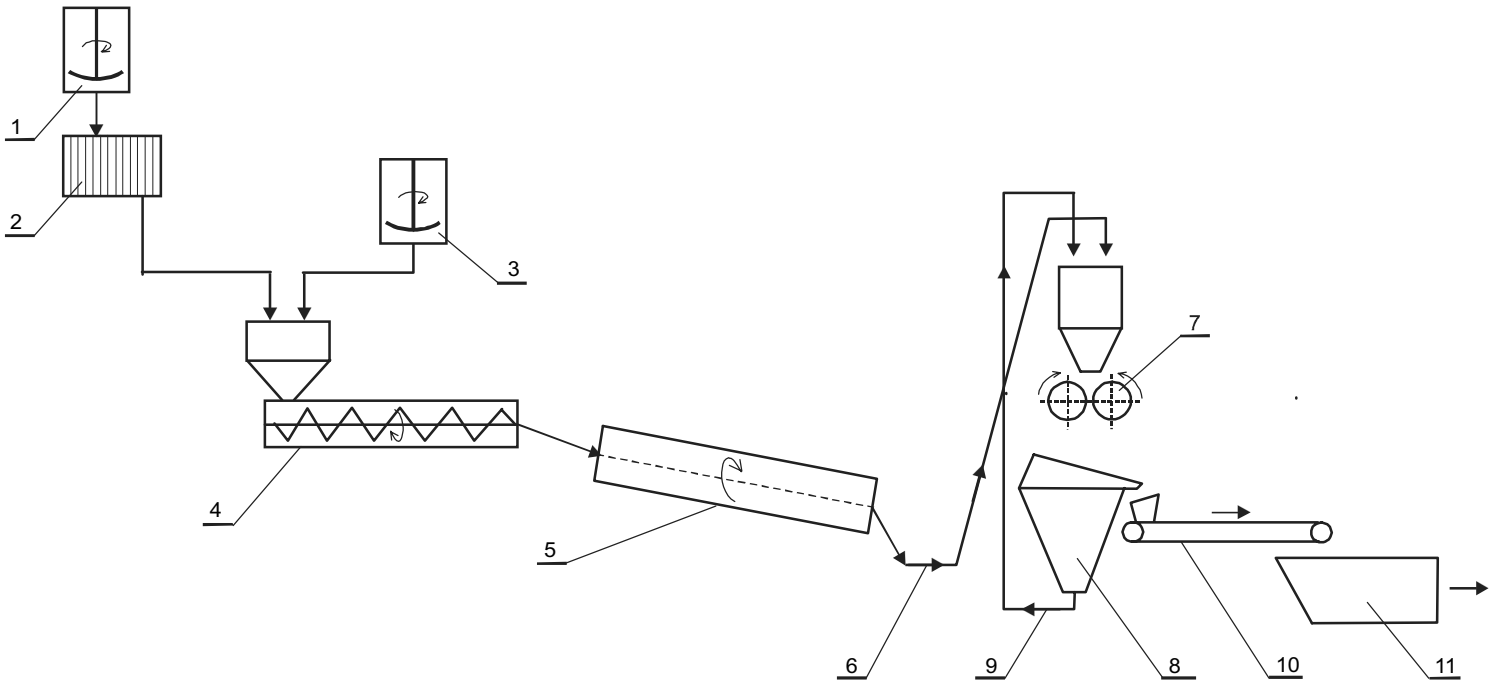
Rys. 1.8. Schemat instalacji do granulowania materiałów drobnoziarnistych [26]

Technologia utylizacji poszlifierskich odpadów żelazonośnych

Technolgię opracowano dla potrzeb utylizacji drobnoziarnistych odpadów przemysłu łożyskowego powstających podczas szlifowania kulek łożyskowych oraz innych elementów łożysk tocznych [6]. Odpady te zaliczane są do grupy niebezpiecznych ze względu na znaczną zawartość chromu. W Polsce powstaje rocznie ok. 4400 ton tego typu odpadów. Metoda utylizacji odpadów poszlifierskich polega na ich scalaniu oraz wykorzystaniu w procesie przetapiania złomu stalowego w piecach hutniczych. Scalanie wykonano metodą brykietowania przy pomocy prasy walcowej. Prasy walcowe stosowane są do brykietowania rozmaitych drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych do których należą: zendra, pyły wielkopiecowe, mułki zgorzelinowe, szlamy konwertorowe, szlamy z mokrego oczyszczania gazów wielkopiecowych, szlamy poszlifierskie, pylisty żelazomangan oraz drobnoziarnisty żelazokrzem. Koncepcję przemysłowej linii technologicznej do brykietowania łożyskowych odpadów poszlifierskich z zastosowaniem prasy walcowej przedstawiono na rysunku 1.9.

Materiał odpadowy do brykietowania odpowiednio przygotowano – określono jego skład chemiczny i właściwości fizyczne, rodzaj i zawartość lepiszcza oraz najkorzystniejszą wilgotność mieszanki. Jako lepiszcze należy stosować melasę w ilości ok. 8% masy odpadów. Następnie należy mieszać odpady z melasą w mieszarce z dosuszaniem termicznym doprowadzając mieszankę do wilgotności ok. 5%. Do brykietowania przygotowanej mieszanki zaleca się stosowanie prasy walcowej LPW 450 wraz z układem formującym umożliwiającym wytwarzanie brykietów w kształcie „siodła". Stosując nacisk jednostkowy ok. 65 MPa uzyskuje się trwałe i wytrzymałe brykiety spełniające dopuszczalne wymogi hutnictwa i nadające się do wykorzystania jako komponent wsadu pieca stalowniczego. Zanim brykiety skierowane zostaną do przetopu należy je sezonować przez okres co najmniej 120 godzin. Zaleca się przetapianie brykietów w łukowym piecu elektrycznym. Proces ten polega na nagrzewaniu i roztapianiu wsadu, składającego się ze złomu stalowego oraz brykietów, do całkowitego roztopienia po uzyskaniu temperatury około 1580 °C. Następnie należy odlewać uzyskaną fazę ciekłą oraz odczekać do jej zakrzepnięcia. Zastąpienie części złomu brykietami z odpadów łożyskowych jest w pełni uzasadnione, gdyż skład chemiczny kąpieli metalowej z brykietami jest zbliżony do składu chemicznego kąpieli powstałej po stopieniu wyłącznie złomu. Wprowadzenie do procesu wytapiania stali brykietów nie powoduje zwiększonej emisji uciążliwych pyłów do atmosfery, natomiast obecne w brykietach węglowodory ulegają rozkładowi.

W proponowanej linii technologicznej (rys. 1.9) zaproponowano termiczne dosuszanie odpadów w suszarce bębnowej. Można również stosować dosuszanie w naturalnych warunkach atmosferycznych na poletku składowym. Jednakże, mimo większych nakładów i kosztów eksploatacyjnych, linia z dosuszaniem



Rys. 1.9. Koncepcja linii technologicznej do brykietowania łożyskowych odpadów poszlifierskich [6]:

1 – zbiornik osadu poszlifierskiego, 2 – prasa filtracyjna, 3 – zbiomik melasy, 4 – mieszalnik ślimakowy, 5 – suszarka bębnowa, 6 – przenośnik kubełkowy, 7 – brykieciarka walcowa, 8 – separator, 9 – przenośnik kubełkowy do zawrotu odsiewu, 10 – przenośnik taśmowy do odbioru brykietów, 11 – kontener na brykiety

termicznym może przynieść większe korzyści z przeróbki znacznej masy odpadów drobnoziarnistych pochodzących nie tylko z przemysłu łożyskowego.

Podsumowując przegląd wybranych metod unieszkodliwiania przemysłowych odpadów drobnoziarnistych, można zauważyć, że istnieje duża różnorodność oraz możliwości wykorzystania cennych surowców znajdujących się w analizowanych odpadach. Równocześnie stwierdza się, że stosowane metody skutecznie unieszkodliwiają substancje niebezpieczne, stanowiące zagrożenie dla środowiska naturalnego.

1.4. Piśmiennictwo

1. Benesch R., Janowski J. i in. 1997: Przydatność i możliwość zastosowania brykietów z mułków zgorzelinowych w procesie wielkopiecowym. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 4: 128–131.
2. Bień J.B., Bień J.D., Matysiak B. 2000: Badania nad możliwością przetwarzania pozostałości koksowych po pirolizie osadów ściekowych w brykiety. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 3, 1–2: 157–162.
3. Borowski G. 2003: Scalanie łożyskowych odpadów poszlifierskich w aspekcie ich utylizacji w hutnictwie. *Eksploatacja i Niezawodność*, 2(18): 21–23.
4. Borowski G., Hryniewicz M., Kuczmaszewski J. 2004: Management of Ferrous Metal Wastes. Proceedings of the REWAS'2004 – Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, Madryt: 1933–1942.
5. Borowski G., Kuczmaszewski J., 2003: Badania możliwości użytkowego wykorzystania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego. *Teka Komisji Budowy i Eksploatacji Maszyn, Elektrotechniki, Budownictwa*, t. I, PAN Lublin: 77–81.
6. Borowski G. 2005: Badania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w aspekcie ich użytkowego wykorzystania. Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska.
7. Dec R. 1991: Study of Compaction Process in Roll Press. Proceedings of The Institute for Briquetting and Agglomeration, vol. 22: 31–40.
8. Drzymała Z. 1993: Industrial Briquetting – Fundamentals and Methods. Studies in Mechanical Engineering, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
9. Drzymała Z. 2001: Rozwój technologii utylizacji wiórów metalowych. Materiały Konferencji nt. „Projektowanie Procesów Technologicznych", Poznań: 59–68.
10. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1993: Grundlagen des Reibungs – und Verchleißprozesses während der Brikettierung feinkörniger Materialien in Walzenpressen. Köppern Brikettier-Kolloquium, Hattingen: 19–38.
11. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1994: A New Approach to Brown Coal Binderless Briquetting. Proceedings of the 12th International Coal Preparation Congress, Kraków: 377–383.

12. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1995: Rozwój badań nad brykietowaniem drobnoziarnistych odpadów produkcyjnych. Materiały I Międzynarodowej Konferencji nt. „Zagospodarowanie i utylizacja odpadów górniczych i hutniczych", Polanica: 51–58.
13. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1997: Wyniki badań nad zastosowaniem brykietowania w procesie przygotowania do utylizacji drobnoziarnistych odpadów przemysłowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej – Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 21: 25–32.
14. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1996: Możliwości przygotowania na drodze mechanicznej drobnoziarnistych odpadów hutniczych do racjonalnej utylizacji. Materiały XVI Konferencji Naukowo-Technicznej Huty Katowice S.A., Szczyrk: 50–56.
15. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1997: Kompleksowe badania nad zastosowaniem brykietowania w procesie przygotowania do utylizacji wybranych drobnoziarnistych odpadów przemysłowych. Materiały I Konferencji „Recyklace odpadů", Ostrawa: 151–158.
16. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1999: O doskonaleniu konstrukcji układu zagęszczania pras walcowych do brykietowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych. *Przegląd Mechaniczny*, 14: 8–13.
17. Drzymała Z., Hryniewicz M. 2000: Koncepcja udoskonalonej konstrukcji uniwersalnej prasy walcowej. *Problemy maszyn roboczych*, 15: 39–46.
18. Drzymała Z., Hryniewicz M., Balak C. 1999: Kompleksowa metoda utylizacji drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych – przykład konstruktywnej współpracy HTS S.A. i AGH. Materiały Sesji Naukowo-Technicznej z okazji 50-lecia HTS S.A., Kraków: 69–80.
19. Drzymała Z., Hryniewicz M., Balak C. 1999: Rozwój technologii utylizacji uwodnionych drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych w HTS S.A. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Odpady przemysłowe i komunalne, powstawanie oraz możliwości ich zagospodarowania", Kraków: 101–109.
20. Drzymała Z., Hryniewicz M., Janewicz A. 2000: Badania nad sposobem utylizacji odpadowego tlenku cynku. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej – Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 27: 61–70.
21. Duszyc Z., Mastalski J., Paluchiewicz Z. 1999.: Badania nad granulowaniem odpadów w oparciu o proces zestalania/stabilizacji. Instytut Gospodarki Odpadami, Katowice.
22. Duszyc Z., Paluchiewicz Z. 1998: Koncepcja budowy i funkcjonowania zakładu przerobu odpadów i produkcji sztucznego kruszywa. Instytut Gospodarki Odpadami, Katowice.
23. Frączek M., Łukwiński L., Maziarz E. 1988: Sprawozdanie z pracy badawczej „Utylizacja odpadów poszlifierskich stalowych z wykorzystaniem ich w przemyśle". Instytut Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach.
25. Hryniewicz M. 1997: Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji. *Zeszyty Naukowe AGH – Rozprawy i Monografie*, 58, Kraków.

26. Hryniewicz M. 2002: Badania procesów przygotowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych do recyklingu. Materiały IV Forum Inżynierii Ekologicznej, Nałęczów: 75–83.
27. Hryniewicz M., Borowski G., Kuczmaszewski J. 2003: Badania nad sposobem utylizacji odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego. Materiały VII Międzynarodowej Konferencji „Recyklace Odpadu", Ostrawa: 95–102.
28. Kapias P., Płonka J. 1992: Próby przemysłowe brykietowania koncentratów miedzi przy użyciu nowego środka wiążącego na bazie skrobi wyprodukowanego w skali przemysłowej w Z.Ch. Złotniki. Instytut Metali Nieżelaznych, Gliwice.
29. Kelly J., Landow M. 1996: Przekształcanie odpadów hutniczych w surowce wtórne. Materiały Konferencji Naukowej nt. „Odpady hutnicze i produkty uboczne", Pittsburg.
30. Krogulec N. 1998: Wybrane fizykochemiczne metody unieszkodliwienia odpadów. *Ekoinżynieria*, 2 (27): 29–34.
31. Kuczmaszewski J., Lutek K., Weroński W. 1990: Badania nad możliwością wykorzystania odpadów poprodukcyjnych o dużym stopniu dyspersji. *Inżynieria Materiałowa*, 1: 152–154.
32. Lutek K., Kuczmaszewski J., Lutek W. 1997: Brykietowanie odpadów przemysłowych w postaci zużytej masy formierskiej i odpadów pogalwanicznych. *Folia Societatis Scientiarum Lublinensis,* vol. 6, nr 1–2: 15–19.
33. Niesler M. 2001: Możliwość zastosowania w procesie wielkopiecowym brykietów z odpadów hutniczych wykonanych w brykieciarkach stemplowych. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 1: 4–8.
34. Niesler M. 2001: Brykietowanie niektórych odpadów hutniczych przy zastosowaniu pras stemplowych. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 1: 1–16.
35. Piecuch T. 1990: Odzysk materiałów ściernych, wolframu i stali wolframowej ze szlamów produkcyjnych. Wydawnictwo Uczelniane WSI, Koszalin.
36. Pietsh W. 1991: Size Enlargement by Agglomeration. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
37. Płonka J., Gębczyk W., Szuba S., 1990: Opracowanie technologii brykietowania pyłów stalowniczych pochodzących z elektrycznych pieców łukowych. Cz. I. Przeprowadzenie wstępnych prób doboru lepiszcza do brykietowania pyłów stalowniczych z elektrycznych pieców łukowych. Instytut Metali Nieżelaznych, Gliwice.
38. Raport 2003: Stan środowiska w Polsce w latach 1996–2001. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
39. Rosik-Dulewska Cz. 2000: Podstawy gospodarki odpadami. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
40. Siuta J. 1997: Wytwarzanie, użytkowanie i szkodliwość odpadów. *Ekoinżynieria*, 4: 9–15.
41. Wiatr I., Marczak H., Sawa J. 2003: Ekoinżynieria. Podstawy działań naprawczych w środowisku. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski, Lublin.

2. ODPADY Z OBRÓBKI SZLIFIERSKIEJ I ICH WŁAŚCIWOŚCI

2.1. Specyfika procesu szlifowania

Szlifowanie jest specyficzną odmianą obróbki ubytkowej skrawaniem. Wyróżniają ją następujące ważniejsze elementy:

- duża liczba ostrzy,
- losowe rozmieszczenie ostrzy w strukturze ściernicy,
- różny kształt i wielkość ostrzy,
- wysoka energochłonność procesu,
- z reguły relatywnie do innych obróbek wysoka temperatura procesu,
- uzależnienie efektów obróbki od takich parametrów ściernicy jak struktura, materiał ziarna czy rodzaj spoiwa.

Efekty procesu szlifowania, charakteryzowane najczęściej dokładnością wymiaru i kształtu oraz dokładnością powierzchni, zależą od wielu czynników, między innymi:

- stanu maszyny technologicznej oraz oprzyrządowania,
- stanu ściernicy,
- przedmiotu szlifowanego, zwłaszcza jego sztywności, cech geometrycznych oraz stanu fizykochemicznego warstwy wierzchniej,
- parametrów technologicznych procesu,
- właściwości cieczy technologicznej oraz parametrów jej podawania.

Jednym z ważniejszych elementów kształtujących stan warstwy wierzchniej w procesie obróbki szlifowaniem jest ciepło. Temperatura w strefie szlifowania osiąga 1000 ^{o}C a nawet więcej. Najprostsze równanie bilansu cieplnego procesu szlifowania może mieć postać:

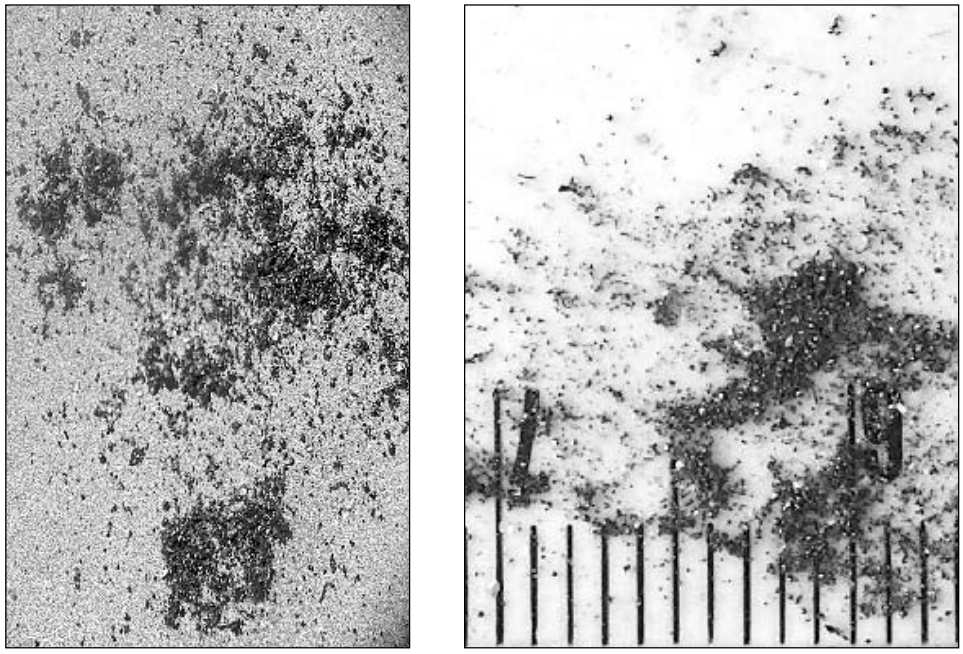
$$Q = Q_w + Q_p + Q_s + Q_o \tag{2.1}$$

gdzie: Q_w – ciepło odprowadzane przez wiór, Q_p – ciepło odprowadzane przez przedmiot, Q_s – ciepło odprowadzane przez ściernicę, Q_o – ciepło odprowadzane do otoczenia.

Udział poszczególnych składników zależy od wielu czynników. Szczególnie ważne jest to, czy obróbka dotyczy powierzchni płaskich czy walcowych. Z reguły dąży się do tego aby Q_p było jak najmniejsze. Jest to składnik w bilansie bardzo istotny, szacuje się, że zawiera się on w granicach (30 – 80)%.

2.2. Mechanizm powstawania wióra i czynniki wpływające na jego właściwości

Mechanizm powstawania wióra zależy od różnorodnych czynników [1, 2, 3]. Można założyć, że dla każdego ostrza jest odmienny. Najogólniej rzecz ujmując, w pierwszej fazie następują odkształcenia sprężyste materiału, następnie odkształcenia plastyczne aż do momentu, gdy materiał zaczyna płynąć przed ostrzem i na boki. Stąd też wynika fakt, że wióry różnią się między sobą kształtem i stopniem zgniotu. Różnią się także wielkością, gdyż proces oddzielania „spiętrzonego" przed ostrzem materiału jest procesem losowym. Determinowany jest on wprawdzie wielkością ziarna, ale należy zauważyć, że każde ziarno znajdujące się na powierzchni czynnej ściernicy znajduje się w różnym stopniu zużycia. Obserwując powierzchnię po szlifowaniu można zauważyć, że obok wyraźnych śladów obróbki poszczególnych ostrzy, widoczne są tylko delikatne zarysowania powierzchni jako efekt odkształceń plastycznych strefy oddziaływania ostrza. Należy także zauważyć, że w trakcie ruchu ostrza po torze krzywoliniowym następuje zmiana geometrii strefy tworzenia wióra. W rezultacie proces tworzenia wióra jest wynikiem procesu tarcia i ścinania. Typową postać odpadów po szlifowaniu przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Typowa postać odpadów powstających w procesie szlifowania

Wióry mają najczęściej charakter:

- wstęgowy, prawie gładki z małą ilością rys,
- wstęgowy z płytkimi szczelinami,
- schodkowy o głębokich szczelinach i dużym stopniu zgniotu.

Z analizy geometrycznej wynika, że w podobnych warunkach szlifowania największe długości styku ziarn ściernych z materiałem obrabianym występują podczas szlifowania czołowego, mniejsze podczas szlifowania obwodowego wewnętrznego a najmniejsze podczas szlifowania obwodowego zewnętrznego. Należy także zauważyć, że długość styku ziarna ściernego z materiałem zależy od tego, czy jest to szlifowanie współbieżne czy przeciwbieżne.

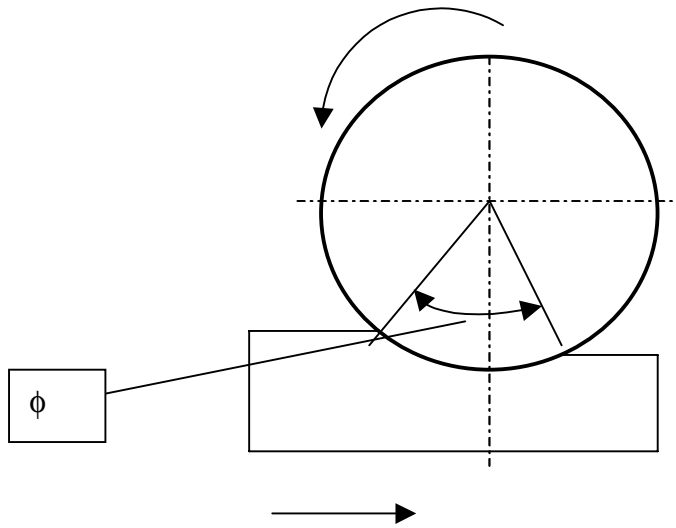
Teoretyczną długość łuku skrawania dla szlifowania współbieżnego i przeciwbieżnego można obliczyć z zależności:

$$L_{pb} = \frac{D}{2}(\phi - d\phi) \text{ – dla szlifowania przeciwbieżnego} \qquad (2.2)$$

$$L_{wsp} = \frac{D}{2}(\phi + d\phi) \text{ – dla szlifowania współbieżnego.} \qquad (2.3)$$

gdzie: D – średnica szlifowanego walca, ϕ – kąt styku jak na rysunku 2.2.

Zależność tą w sposób uproszczony przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Teoretyczna długość łuku skrawania przy szlifowaniu obwodowym powierzchni walcowej, ϕ – czynny kąt pracy ściernicy (kąt styku)

Rzeczywista długość łuku jest funkcją bardzo wielu czynników, już wymienionych, przede wszystkim zmiennych w czasie warunków szlifowania, właściwości sprężystych ściernicy i materiału szlifowanego, parametrów technologicznych procesu i in. Ponadto, biorąc pod uwagę znaczne różnice prędkości obwodowej ściernicy i prędkości obwodowej przedmiotu (dla przedmiotów walcowych) lub posuwu wzdłużnego przedmiotu (przy szlifowaniu płaszczyzn) często wpływ różnicy długości łuku przy szlifowaniu współbieżnym i przeciwbieżnym jest pomijany.

Obok kształtu, także cechy fizykochemiczne warstwy wierzchniej decydują o właściwościach wiórów w aspekcie ich użytkowej utylizacji. Cechy te kształtowane są przede wszystkim przez ciepło w strefie szlifowania oraz właściwości zastosowanej cieczy technologicznej, także przez cechy ściernicy.

2.3. Składniki odpadów w procesie szlifowania

2.3.1. Szlifowany materiał

Najważniejszym składnikiem odpadów z obróbki szlifowaniem jest rozdrobniony materiał który poddany był obróbce. W zdecydowanej większości przypadków są to żeliwo i stal. Warto zauważyć, że szlifowanie nie tylko pełni funkcję obróbki wykańczającej, czasem jest to obróbka zgrubna. Ma to zwłaszcza miejsce podczas obróbki odlewów, gdzie pozostałość masy formierskiej bardzo niekorzystnie wpływa na trwałość narzędzi do klasycznej obróbki wiórowej. Ma to także miejsce w innych przypadkach. Takim przykładem jest tzw. zdzieranie kulek łożyskowych, obróbka przeprowadzana bezpośrednio po kuciu. W tych przypadkach odpady mają zasadniczo różny kształt i właściwości jak w przypadku obróbki wykańczającej. Zgniot i wysoka temperatura procesu sprawiają, że wióry są w znacznym stopniu postrzępione oraz pokryte warstwą tlenków.

2.3.2. Materiały ścierne

Stosuje się różne wskaźniki zużycia ściernicy w rozumieniu makroskopowym. Z punktu widzenia dokładności wymiarów ważny jest wskaźnik szybkości zużycia promieniowego. W analizowanym procesie szlifowania odpadów wskaźnik zużycia objętościowego informuje o objętości ściernicy utraconej wskutek procesu eksploatacji w określonym czasie.

Warunkiem zaistnienia procesu szlifowania jest dostateczna twardość i odporność cieplna materiału ściernego. Materiały ścierne ze względu na pochodzenie można podzielić na materiały pochodzenia naturalnego oraz tzw. materiały

sztuczne. Do materiałów ściernych naturalnych zalicza się: krzemień, granat, szmergiel, korund i diament, pumeks, kredę, talk [1, 2, 3]. Materiały ścierne sztuczne to przede wszystkim: elektrokorund zwykły, półszlachetny i szlachetny, elektrokorundy modyfikowane, węglik krzemu zielony i czarny, węglik boru, regularny azotek boru i diament syntetyczny [3]. Większe znaczenie mają materiały syntetyczne.

Kwarc (SiO_2), którego odmianą jest krzemień, zawiera zwykle liczne domieszki jest stosunkowo miękkim materiałem stosowanym głównie do ostrzenia i polerowania, na papiery i płótna ścierne.

Granat jest minerałem zawierającym związki aluminium, żelaza, chromu, wapnia, magnezu, manganu z kwasem krzemowym. Twardością jest zbliżony do krzemienia, ma jednak większą gęstość. Stosowany jest na papiery i płótna ścierne do specjalnych zastosowań.

Korund naturalny zawiera (80 – 95)% Al_2O_3. Jest materiałem twardym (około 9 w skali Mohsa). Jego charakterystyczną cechą jest stosunkowo wysoka ciągliwość co obrazuje się w dość regularnych, nieostrych przełomach. Te względy sprawiają, że stosuje się go głównie do polerowania szkła optycznego.

Szmergiel zawiera (40 – 65)% Al_2O_3 oraz liczne domieszki, zwłaszcza tlenki żelaza, krzemu i tytanu. Jego twardość jest zbliżona do korundu naturalnego, podobne jest też jego zastosowanie.

Diament naturalny jest czystym węglem. Twardość diamentu wynosi 10 w skali Mohsa. Narzędzia ścierne z nasypem diamentowym stosowane są raczej do przecinania, ponadto diament syntetyczny stosowany jest do cięcia szkła, końcówki ciągadeł, wgłębniki.

Elektrokorund to krystaliczny tlenek glinu otrzymywany przez topienie i krystalizację boksytu lub tlenku glinu w piecach elektrycznych. W zależności od zawartości domieszek, zwłaszcza tlenków, krzemu, żelaza, tytanu, wapnia, magnezu rozróżnia się elektrokorund zwykły, półszlachetny i szlachetny. Twardość elektrokorundu wynosi 9 w skali Mosha. Jest to bardzo popularny materiał ścierny.

Węglik krzemu (SiC) jest związkiem żelaza z węglem o twardości 9,5 w skali Mohsa. Jest obok elektrokorundu najbardziej popularnym materiałem ściernym. Występuje w odmianach zielonych i czarnych. Jest nieco bardziej odporny na ciepło od elektrokorundu. Jest najczęściej wykorzystywany do produkcji taśm ściernych i past służących do docierania. Zielony węglik krzemu służy także do ostrzenia narzędzi ze stali szybkotnącej. Ważną cechą węglika krzemu jest mały współczynnik rozszerzalności liniowej.

Węglik boru jest minerałem sztucznym otrzymywanym na drodze elektrotermicznej z mieszaniny bezwodnika kwasu borowego i węgla. Węglik boru (B_4C) ma twardość w skali Mohsa 9,9, jest więc po diamencie najbardziej twardym materiałem. Ze względu na podwyższoną kruchość stosowany jest

w postaci luźnego ścierniwa do proszków i past ściernych, zwłaszcza do docierania bardzo twardych materiałów. W temperaturach powyżej 400 °C utlenia się, stąd też nie jest stosowany do budowy ściernic.

Azotek boru (BN) otrzymuje się w wyniku pirolizy kompleksu trójchlorku boru z amoniakiem, następnie produkt takiej reakcji jest poddawany działaniu wysokiej temperatury i ciśnienia. W ten sposób powstaje regularny azotek boru, bardzo twardy i odporny na działanie ciepła materiał ścierny. Znajduje zastosowanie do obróbki wykańczającej trudnoobrabialnych stali stopowych, zawierających węgliki.

Diament syntetyczny jest jedną z alotropowych odmian węgla powstający w zdecydowanej większości z grafitu w wyniku wysokociśnieniowej i wysokotemperaturowej syntezy w obecności metalicznego niklu jako katalizatora. Ściernice diamentowe ze spoiwem żywicznym zalecane są do dokładnego szlifowania węglików spiekanych i ostrzenia narzędzi skrawających.

Narzędzia ścierne mogą występować w postaci spojonej (ściernice, segmenty ścierne, osełki), jako tzw. narzędzia nasypowe (arkusze, taśmy, krążki, ściernice listkowe) oraz pasty.

2.3.3. Spoiwa

Spoiwa można podzielić na dwie zasadnicze grupy [1, 2, 3]:

- spoiwa nieorganiczne, do których należą przede wszystkim spoiwa ceramiczne, magnezytowe, krzemianowe, metaliczne,
- spoiwa organiczne, takie jak żywiczne, gumowe i klejowe.

Spoiwa ceramiczne są mieszaninami wielu składników, które odpowiednio rozdrobnione i wymieszane są następnie spiekane wraz z materiałem ściernym. Ważniejsze składniki spoiwa ceramicznego to skaleń, kaolin, glinki ogniotrwałe, kwarc, stopione składniki szkliwa powodujące obniżanie temperatury wypalania. Spoiwa ceramiczne są dobierane do konkretnego materiału ściernego. Są to materiały odporne na działanie olejów oraz niewrażliwe na wilgoć, co pozwala podczas szlifowania stosować obfite chłodzenie.

Spoiwo magnezytowe składa się z magnezytu kaustycznego i roztworu wodnego chlorku magnezowego. Jest to spoiwo służące do wytwarzania ściernic miękkich. Są one stosowane do szlifowania na sucho, także cienkich elementów przy niskiej temperaturze procesu. Spoiwo to jest kruche, wrażliwe na wilgoć i zmiany temperatury. Podobne właściwości i zastosowania ma także spoiwo krzemianowe powstające ze szkła wodnego z dodatkiem fluorokrzemianu sodowego i substancji wypełniających.

Spoiwa metalowe stosuje się w produkcji ściernic diamentowych. Składają się z proszków metali nieżelaznych oraz tlenków i węglików metali. Są to kompozycje na osnowie miedzi, cyny, niklu, żelaza, aluminium i innych metali. Najbardziej typowe są spiekane spoiwa brązowe, a wśród spoiw galwanicznych spoiwa niklowe. Kompozycje te odznaczają się dużą wytrzymałością i odpornością cieplną.

Spoiwa żywiczne stosowane są przede wszystkim tam, gdzie mogą występować obciążenia udarowe oraz na ściernice do przecinania ściernego. Najczęściej stosowane są żywice fenolowo-formaldehydowe. Bardzo często są one modyfikowane chemicznie, poprzez dodawanie innych środków chemicznych, na przykład epoksydów, amidów, aldehydów, bądź też modyfikowane fizycznie poprzez dodawanie napełniaczy.

Spoiwa gumowe odznaczają się największą niewrażliwością na obciążenia udarowe. Składają się głównie z kauczuku naturalnego lub syntetycznego. Są one wrażliwe na obciążenia cieplne.

Spoiwa do past ściernych to często wieloskładnikowe mieszaniny zawierające takie składniki jak stearyna, wosk, parafina, wazelina, tłuszcz zwierzęcy i inne.

Analizując materiały stosowane na spoiwa należy zauważyć przede wszystkim ich różnorodność pod względem właściwości. W zależności od ich udziału w strukturze odpadów różnie będą się kształtowały właściwości materiału odpadowego w aspekcie ich użytkowego wykorzystania.

2.3.4. Ciecze technologiczne

Ciecze technologiczne mają wieloaspektowy wpływ na proces szlifowania. Ważniejsze cechy i funkcje cieczy technologicznych w procesie szlifowania są następujące [1, 2, 3]:

- odpowiednia smarność,
- zdolność chłodzenia, wypłukiwania i zwilżania,
- antykorozyjność,
- odpowiednia lepkość,
- odporność na starzenie,
- bakteriobójczość,
- dobre właściwości emulgujące,
- niespienialność,
- zdolność oddzielania zanieczyszczeń,
- filtracyjność,
- nieszkodliwość dla zdrowia,
- zdolność do regeneracji.

Najważniejsze funkcje cieczy technologicznych w procesie szlifowania to zdolność odprowadzania ciepła, smarowanie, działanie emulgujące oraz działanie powierzchniowo-aktywne.

Ciecze technologiczne dzielą się na dwie podstawowe grupy: zawierające wodę a więc rozpuszczalne w wodzie, oraz nie zawierające wody. Ze względu na postać można wyróżnić: gazy, mieszaniny cieczy i gazów, ciecze, ciecze z zawiesiną ciał stałych oraz pasty.

Ciecze nie mieszające się z wodą oparte są na olejach. Oleje wykazują dobre właściwości smarne i antykorozyjne, nie wymagają więc stosowania inhibitorów korozji. Wadą tego typu cieczy jest ich słabe działanie chłodzące.

Wodne emulsje olejowe są układami dyspersyjnymi w których fazą rozpraszającą jest woda a fazą rozproszoną olej. Zawartość oleju zwykle zawiera się w przedziale (1 – 2)%. Rozmiary cząsteczek oleju mogą przekraczać 10 μm a mogą być także mniejsze od 0,001 μm. Emulsje z tak drobnymi rozmiarami cząstek mają dobrą przezroczystość co ułatwia obserwację strefy obróbki. Emulsje zawierają zwykle inhibitory korozji, środki powierzchniowo-aktywne oraz bakteriobójcze.

W sytuacji gdy zasadniczym celem cieczy technologicznej jest efektywne odprowadzanie ciepła oraz wypłukiwanie produktów obróbki i wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń stosuje się bezolejowe roztwory wodne.

Odpady poszlifierskie zawierają obok materiału szlifowanego w postaci rozdrobnionej, także produkty zużycia ściernicy (materiał ścierny, spoiwo) oraz ciecz technologiczną. Materiały te bardzo różnią się między sobą właściwościami fizykochemicznymi. Warto także dodać, że są szkodliwe dla środowiska, szczególnie ze względu na zawartość chromu w stalach łożyskowych, także ze względu na ciecz technologiczną, która często jest sprzyjającym środowiskiem dla rozwoju bakterii.

2.4. Piśmiennictwo

1. Dmochowski J. 1981: Podstawy obróbki skrawaniem. PWN, Warszawa.
2. Kaczmarek J. 1970: Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej. WNT, Warszawa.
3. Oczoś K., Porzycki J. 1986: Szlifowanie. Podstawy i technika. WNT, Warszawa.

3. FIZYKOCHEMICZNE ASPEKTY PROCESU BRYKIETOWANIA DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW METALOWYCH

3.1. Układy kompozytowe i ich właściwości

Układ kompozytowy lub kompozyt jest materiałem otrzymanym z co najmniej dwóch składników zestawionych w określonych proporcjach. Zwykle w kompozytach wyróżnia się osnowę i zbrojenie. Osnowa może być metaliczna, polimerowa, ceramiczna lub inna. Komponenty zbrojące wprowadza się przede wszystkim w celu:

- modyfikacji właściwości wytrzymałościowych,
- modyfikacji przewodności elektrycznej lub cieplnej,
- modyfikacji właściwości plastycznych,
- zmniejszenia kosztów (w sytuacji, gdy materiał zbrojący jest znacznie tańszy od materiału osnowy).

W kompozytach o wzmocnieniu ziarnistym napełniaczami proszkowymi są najczęściej: mączka lub piasek kwarcowy, kreda, proszki metali, talk, grafit, sadza oraz szkło.

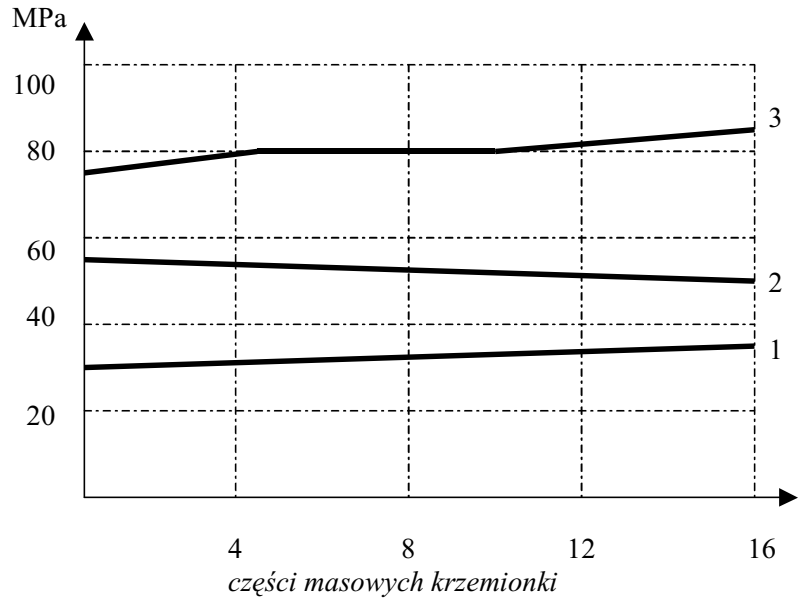
3.1.1. Właściwości układów kompozytowych o wzmocnieniu ziarnistym

Właściwości kompozytu [12, 13] zależą w znacznym stopniu od udziału objętościowego składników, także od stopnia dyspersji napełniaczy. Udział objętościowy proszku wzmacniającego $a_i = v_i/v_c$, gdzie v_i jest objętością fazy zbrojącej, a v_c objętością kompozytu w praktyce można oznaczyć na przekroju jako stosunek powierzchni przekroju i-tego składnika do powierzchni całkowitej przekroju. Współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) i wytrzymałość kompozycji zależą od udziału objętościowego napełniacza. Powierzchnia cząstek napełniacza nie jest jednorodna pod względem energetycznym. Stopień zdyspergowania napełniacza istotnie wpływa na działanie wzmacniające, każdy aglomerat może być miejscem inicjacji dekohezji, cząstki napełniacza są także zarodkami krystalizacji (dla małych udziałów objętościowych).

Na rysunku 3.1 przedstawiono wpływ zawartości krzemionki na niektóre cechy fizyczne kompozytu E5/Z-1/10:1.

Efekt umocnienia kompozytu najczęściej określa się jako stosunek naprężenia na granicy plastyczności materiału kompozytowego do naprężenia na granicy plastyczności osnowy:

$$K_n = \frac{\sigma_{kc}}{\sigma_{oc}} \tag{3.1}$$



Rys. 3.1. Wpływ zawartości krzemionki na niektóre cechy fizyczne kompozytu E5/Z-1/10:1., 1 – Ex100, 2 – R_m, 3 – R_c [15]

Mechanizm wzmocnienia jest nieco odmienny jeśli rozmiary cząstek są na poziomie podkrytycznym (do 1 μm), gdzie należy stosować do analizy podejście atomistyczne, w odróżnieniu do rozmiarów wyższych od 1 μm, gdzie można stosować klasyczne podejście kontynualne. Mechanizm wzmocnienia na poziomie podkrytycznym polega przede wszystkim na blokowaniu ruchów dyslokacji a efektywność umocnienia zależy od średniej swobodnej drogi w osnowie oraz odległości między cząstkami.

W kompozytach o rozmiarach większych od podkrytycznych obciążenie przenosi osnowa i cząstki. Pod wpływem przyłożonego obciążenia wokół cząstki napełniacza powstaje naprężenie τ_i równe iloczynowi pętli dyslokacji [10, 11] n skupionych wokół cząstki i naprężenia pochodzącego od sił zewnętrznych σ:

$$\tau_i = n\sigma \tag{3.2}$$

$$n = \frac{\sigma D_p}{G_0 b} \tag{3.3}$$

stąd $$\tau_i = \frac{\sigma^2 D_p}{G_0 b} \tag{3.4}$$

$$R_{ek} = \sqrt{\frac{G_0 G_p b}{C D_p}} \tag{3.5}$$

gdzie: C – wytrzymałość cząstek.

Podstawową miarą umocnienia oprócz wskaźnika wyrażonego powyższą zależnością jest odporność na pękanie.

W przypadku napełniania proszkami płynnej matrycy (zestalanej następnie w wyniku procesów fizycznych lub chemicznych) następuje wzrost lepkości. Dla napełniaczy nieaktywnych lepkość kompozycji można określić równaniem Einsteina – Gutha – Golda [20], w postaci:

$$\eta_a = \eta_{ao}\left(1 + 2{,}5c + 14{,}1c^2\right) \tag{3.6}$$

gdzie: $\eta_{a,}\eta_{ao}$ – lepkości pozorne kompozytu zawierającego napełniacz i nie napełnionego, c – udział objętościowy napełniacza w kompozycji.

Badając układy dyspersyjne Van der Pool [20] zaproponował następującą zależność

$$\frac{K}{K_0} = \frac{1 + 2\dfrac{1-2\upsilon_0}{1+\upsilon_0}\left[\dfrac{K_0}{K_1}\left(1-\upsilon_c\right)+c_v\right]}{1-c_v+c_v\left[\dfrac{K_0}{K_1}+2\dfrac{K_0}{K_1}\dfrac{1-2\upsilon_0}{1+\upsilon_0}\right]} \tag{3.7}$$

gdzie: K – współczynnik sprężystości podłużnej układu dyspersyjnego, K_0 – współczynnik sprężystości podłużnej fazy rozpraszającej, K_1 – współczynnik sprężystości podłużnej fazy rozproszonej, υ_0 – współczynnik Poissona fazy rozpraszającej, c_v – objętościowe stężenie napełniacza.

W pracy [4] podano zależność na wytrzymałość polimeru z napełniaczem w następującej postaci:

$$\sigma_k = \frac{1}{1+m}\left\{a + \frac{\dfrac{E_{sw}}{E_n}+m\eta}{1+m}\left[\left(Q-N\right)+m\right]\right\}\sigma_{sw} \tag{3.8}$$

przy czym:

$$Q = \frac{2(1+m)}{1-\frac{E_{sw}}{E_n}} \left\{ \sqrt{\frac{1}{1-\left[\frac{1}{1+m}\left(1-\frac{E_{sw}}{E_n}\right)\right]^2}} arctg \frac{1+\frac{1}{m}\left(1-\frac{E_{sw}}{E_n}\right)}{1-\frac{1}{m}\left(1-\frac{E_{sw}}{E_n}\right)} - \frac{\pi}{4} \right\} \quad (3.9)$$

$$m = 0{,}8\left(\sqrt[3]{\frac{V_{sw}}{V_n}+1} - 1{,}25\right) \quad (3.10)$$

gdzie: σ_{sw} – wytrzymałość fazy rozpraszającej, E_{sw} – współczynnik sprężystości podłużnej fazy rozpraszającej, E_n – współczynnik sprężystości podłużnej napełniacza, V_{sw} – objętość napełniacza, V_n – objętość fazy rozpraszającej.

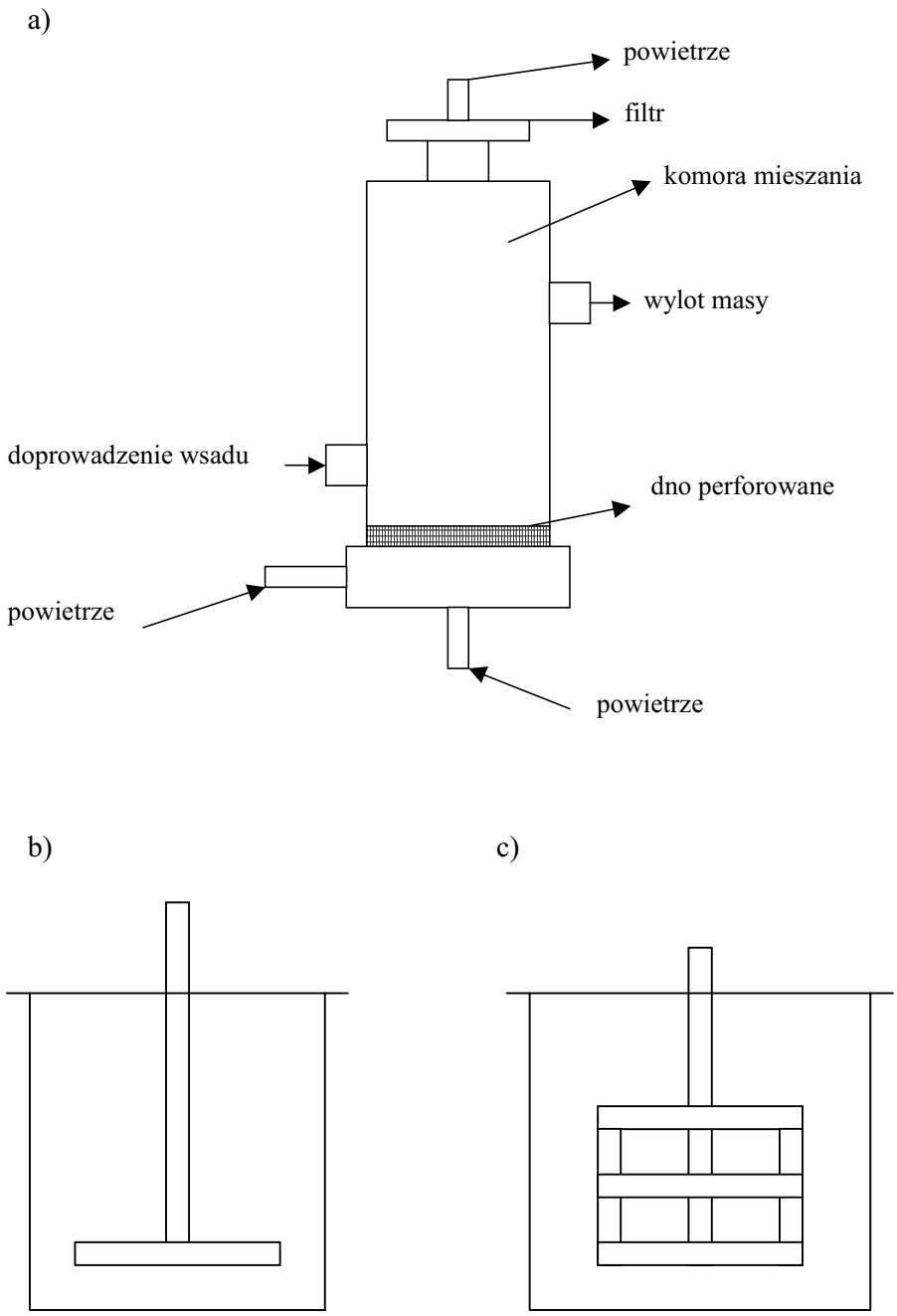
3.1.2. Suszenie, rozdrabnianie, mieszanie

W wielu przypadkach komponenty przed zmieszaniem powinny być poddane procesowi suszenia. Ważniejsze typy suszarek są następujące:

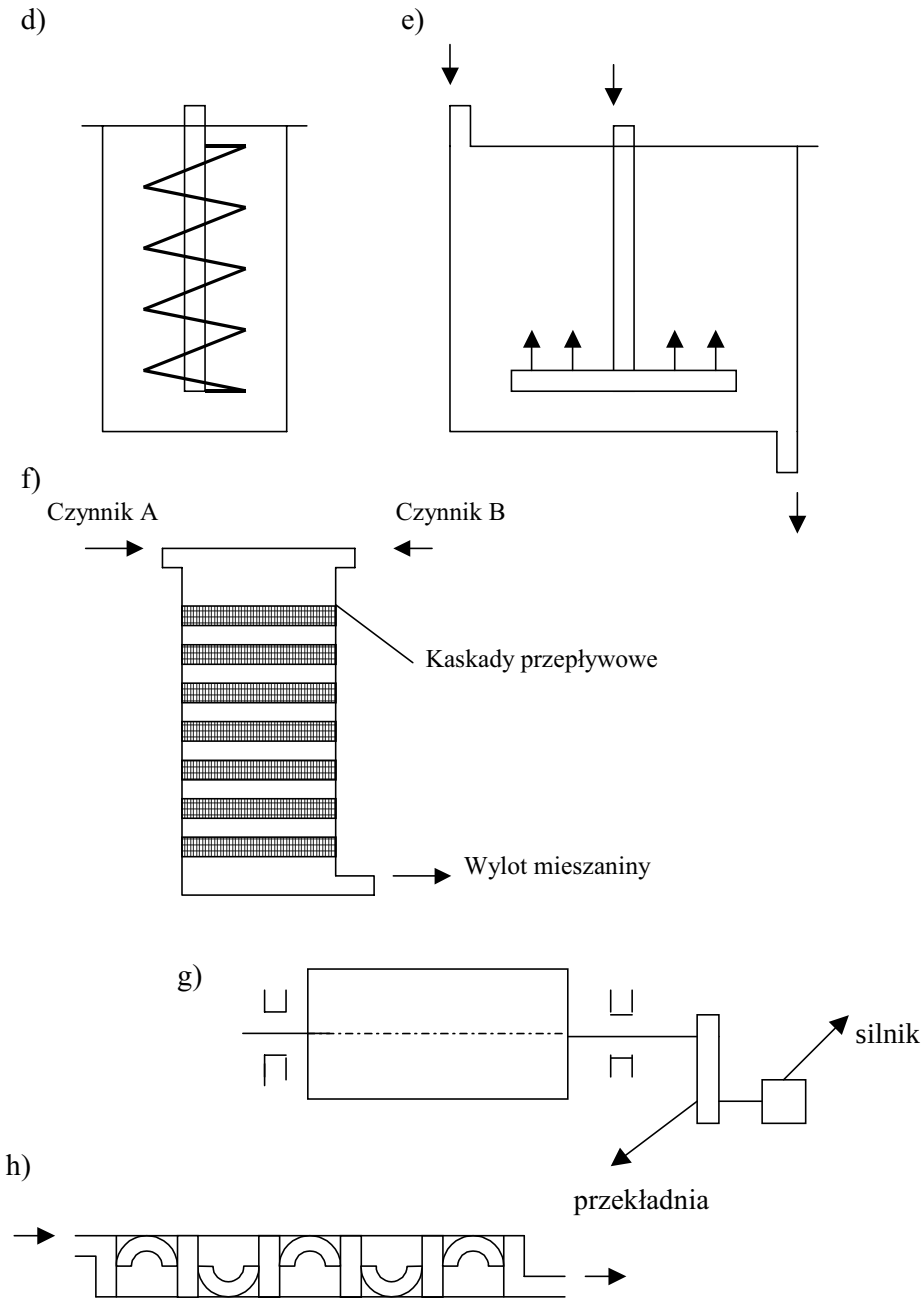
- komorowe,
- zbiornikowe,
- próżniowe,
- fluidalne,
- mikrofalowe,
- bębnowe.

Suszarki komorowe charakteryzują się prostą budową, niską ceną i prostotą konstrukcji. Ich głównym mankamentem są trudności z mieszaniem podczas suszenia. Wady tej nie mają suszarki zbiornikowe, wyposażone najczęściej w mieszadła. Suszarki próżniowe stosowane są zwłaszcza tam, gdzie zależy nam na uzyskaniu bardzo małej wilgotności, także w tych procesach, gdzie suszony materiał może reagować z powietrzem. Suszarki fluidalne stosowane są do suszenia materiałów drobnoziarnistych i włóknistych. Istotę pracy takiej suszarki przedstawiono na rysunku 3.2a. Mieszanie [12] jest ważnym elementem przygotowania do brykietowania drobnoziarnistych odpadów metalowych. Ważniejsze typy mieszarek przedstawiono na rysunku 3.2.

Mieszarki bębnowe (rys. 3.2g) są proste i wygodne w stosowaniu. Ważne jest jednak, aby prędkość kątowa ω była mniejsza niż ω_{kr} w której proces mieszania nie następuje, a wsad obraca się wraz z bębnem rozrzucony siłą odśrodkową



Rys. 3.2. Ważniejsze typy mieszarek [14, 17]: a – mieszarka fluidalna, b – mieszarka mechaniczna z mieszadłem łapowym, c – mieszarka mechaniczna z mieszadłem ramowym,

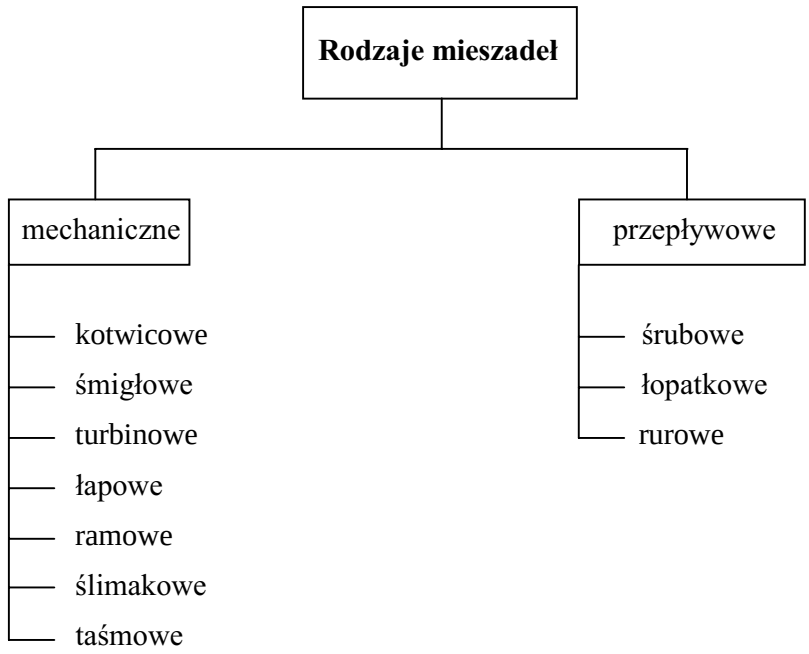


c.d. rys. 3.2.

d – mieszarka mechaniczna z mieszadłem ślimakowym, e – mieszarka komorowa powietrzna, f – mieszarka przepływowa, g – mieszarka wirnikowa, h – mieszarka przepływowa z mieszadłem statycznym

na ścianki bębna. Zwykle stopień napełnienia komory wynosi 0,7 – 0,8. Warto jednak zaznaczyć, że mieszarki bębnowe należą do najbardziej energochłonnych.

Efektywność mieszania zależy w dużej mierze od rodzaju stosowanego mieszadła. Klasyfikację mieszadeł przedstawiono na rysunku 3.3.



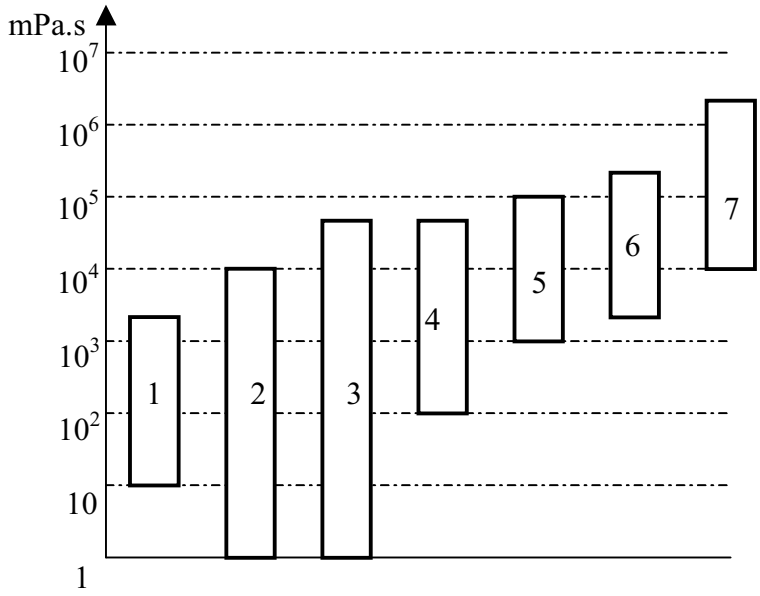
Rys. 3.3. Klasyfikacja mieszadeł [17]

Wybór rodzaju mieszadła zależy w dużym stopniu od lepkości kompozycji. Orientacyjne zalecenia ich doboru przedstawiono na rysunku 3.4.

Nie wszystkie mieszarki mogą mieć zastosowanie do mieszania odpadów po procesie szlifowania. Mieszanie to ma na celu przygotowanie kompozycji w miarę jednorodnej, przy stosunkowo niewielkiej wilgotności, z komponentami które są przydatne, a przynajmniej nieszkodliwe dla procesu stalowniczego. Biorąc pod uwagę specyfikę tego procesu najbardziej przydatne są mieszarki mechaniczne, zwłaszcza ślimakowe.

Efektywność mieszania określają wielkości:

- wartość naprężeń ścinających działających na wsad,
- energia mieszania,
- liczba przejść materiału przez strefę rozdrabniania,
- liczba miejsc podziału płynącego materiału na strumienie,
- szerokość szczeliny między rotorem a komorą mieszania.



Rys. 3.4. Zalecenia doboru rodzaju stosowanego mieszadła w zależności od lepkości kompozycji: 1 – kotwicowe, 2 – śmigłowe, 3 – turbinowe, 4 – łapowe, 5 – ramowe, 6 – ślimakowe, 7 – taśmowe [17]

3.2. Elementy teorii adhezji

Pojęcie „adhezja" wywodzi się od łacińskiego *adhaesio* czyli sczepianie. Adhezję należy więc traktować jako zjawisko powierzchniowe zależne od określonych właściwości materiałów łączonych oraz występowaniem granicy rozdziału między nimi.

Zwykle się przyjmuje, że miejsce sczepienia dwóch materiałów nazywa się **złączem adhezyjnym**, a układ ciało stałe – ciecz – ciało stałe prowadzi do powstania **połączenia adhezyjnego**. Takie połączenie składa się z dwóch złącz, a warstwa utwardzonego materiału adhezyjnego spełnia rolę łącznika.

Klasyczne złącza adhezyjne tworzą ze stałym podłożem farby, lakiery, farby drukarskie, metalizowane tworzywa czy powłoki z tworzyw na podłożu metalowym. Typowe połączenia to połączenia klejowe, kitowe, kompozyty tworzone w technologii laminowania, konstrukcje przekładkowe oraz warstwowe.

Adhezja jest zjawiskiem, którego znaczenie w wielu procesach jest istotne. Szczególne znaczenie mają połączenia adhezyjne, w których adhezja odgrywa dominującą rolę w konstytuowaniu ich właściwości. Dotyczy to zwłaszcza technologii klejenia, uszczelniania, kitowania konstrukcyjnego. Połączenia te coraz

częściej zastępują takie sposoby łączenia jak spawanie, zgrzewanie, lutowanie, połączenia wciskane.

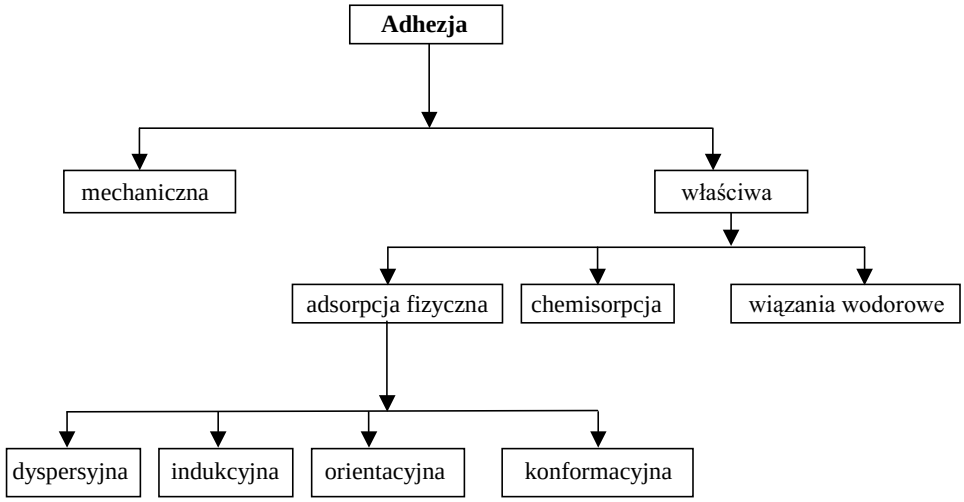
Adhezja dotyczy także wielu technologii związanych z inżynierią powierzchni takich jak malowanie, lakierowanie, nakładanie powłok o specjalnych właściwościach. Ponadto zjawisko adhezji odgrywa istotną rolę w takich technologiach jak produkcja bimetali, metalurgia proszków, brykietowanie materiałów sypkich, procesy flotacji, produkcja laminatów i wiele innych. Także w interpretacji wielu procesów w technice zjawisko adhezji posiada istotne znaczenie. Dotyczy to zwłaszcza procesów tarcia i zużycia.

Analizowane procesy technologiczne w zdecydowanej większości wymagają „dużej" adhezji, ale projektując pary kinematyczne zespołów napędowych istotny jest taki dobór materiałów i takie konstytuowanie ich właściwości aby siły wiązań adhezyjnych były jak najmniejsze. Istotna jest więc odpowiednia wiedza na temat możliwości kształtowania właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych.

3.2.1. Ważniejsze teorie adhezji

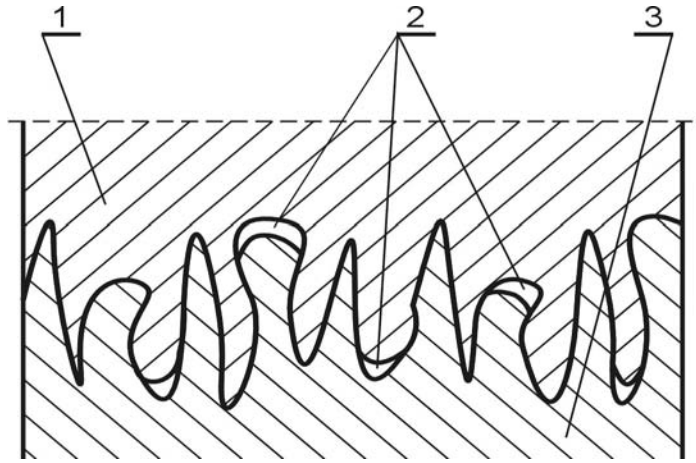
W literaturze przedmiotu, często nawet specjalistycznej, istnieje wiele sprzeczności terminologicznych. Pod pojęciem adhezji czasem rozumie się energię, czasem wytrzymałość, używa się także pojęcia „siła adhezji".

Aktualnie siły i wiązania adhezyjne klasyfikowane są jak na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Klasyfikacja sił i wiązań adhezyjnych [15]

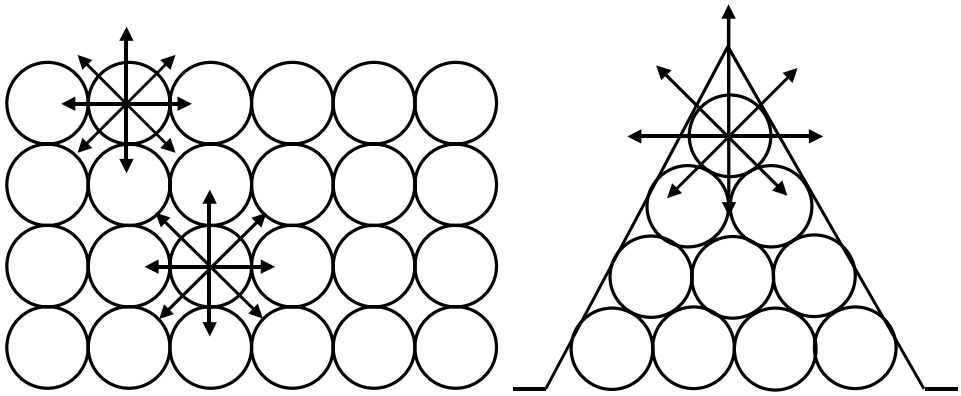
W ujęciu historycznym pierwsze opracowania teoretyczne dotyczące adhezji powstały w latach dwudziestych dwudziestego wieku. Jedną z pierwszych hipotez przedstawił J. W. Mc Bain [3], który za warunek sklejenia uznał konieczność wniknięcia kleju w mikropory łączonych elementów i tworzenia zakotwiczeń mechanicznych zdolnych do przenoszenia obciążeń. W sposób poglądowy istotę adhezji mechanicznej przedstawiono na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Adhezja mechaniczna – rysunek poglądowy: 1 – klej, 2 – zamknięte pęcherze powietrza, 3 – materiał łączony

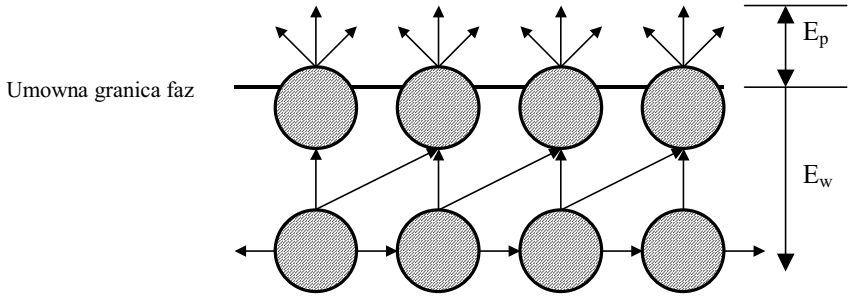
Poglądy na temat znaczenia adhezji mechanicznej zmieniały się z wraz z rozwojem nowych teorii. W pewnym okresie marginalizowano jej znaczenie, aktualnie jednak uważa się, że w niektórych operacjach adhezja mechaniczna odgrywa istotną rolę. Wartość adhezji mechanicznej konstytuowana jest przede wszystkim przez topografię powierzchni. Parametry stereometryczne warstwy wierzchniej odgrywają istotną rolę w procesie adhezyjnego łączenia elementów. Wpływ ten nie wynika tylko z faktu zwiększenia powierzchni rzeczywistej w wyniku jej mechanicznego „rozwinięcia", ale także w wyniku zmian w stopniu niewyrównoważenia sił międzycząsteczkowych w zewnętrznej nanowarstwie atomów i cząsteczek, co przedstawiono na rysunku 3.7.

Stosowany powszechnie w technice do oceny chropowatości powierzchni parametr R_a nie opisuje jednak dobrze cech stereometrycznych powierzchni z punktu widzenia właściwości adhezyjnych. Obecnie istnieją możliwości bardziej obiektywnej oceny cech stereometrycznych powierzchni stosując do jej opisu parametry przestrzenne.



Rys. 3.7. Ilustracja związku wartości swobodnej energii powierzchniowej i cech stereometrycznych łączonych elementów [7]

Ze względu na fakt, że wartość swobodnej energii powierzchniowej odnosi się do kilku warstw atomowych, w sensie technologicznym możemy więc mówić o energii warstwy wierzchniej. Przedstawienie stref oddziaływania swobodnej energii powierzchniowej i energii wewnętrznej przedstawiono na rysunku 3.8.



Rys. 3.8. Przedstawienie stref oddziaływania swobodnej energii powierzchniowej (E_p) i wewnętrznej (E_w) [7]

Parametry określające cechy stereometryczne powierzchni decydują o wielkości powierzchni zwilżania, tzw. powierzchni czynnej [21]. Jeżeli przyjmiemy, że powierzchnia nominalna S_n jest określona makroskopowo przez wymiary geometryczne połączenia, powierzchnia rzeczywista S_{rz} uwzględnia stereometryczne „rozwinięcie" powierzchni nominalnej, a powierzchnia czynna jest powierzchnią zwilżania S_{zw}, to ich wzajemne uszeregowanie pod względem wielkości można przedstawić następująco:

$$S_n < S_{zw} < S_{rz} \tag{3.11}$$

Z praktycznego punktu widzenia ważne jest określenie powierzchni czynnej. Można ją określić z zależności [15]:

$$S_{zw} = \iint_S F(x, y)dxdy \tag{3.12}$$

w której $F(x,y)$ jest funkcją opisującą powierzchnię czynną S_{zw}, jest obszarem nominalnym. Na wartość powierzchni czynnej obok cech stereometrycznych powierzchni mają wpływ cechy reologiczne kleju, ciśnienie a także zespół cech fizykochemicznych łączonych materiałów.

Wnikanie kleju w mikropory łączonych powierzchni zależy od wielu czynników, w tym głównie lepkości, ciśnienia, temperatury, czasu kontaktu a także cech stereometrycznych wgłębień. Opisuje to między innymi równanie [22] w postaci:

$$h = \left(\frac{rt\gamma_L \cos\theta}{2\eta} \right)^{0,5} \tag{3.13}$$

gdzie: h – głębokość wnikania kleju w mikronierówności traktowane jako kapilary o promieniu r, t – czas wnikania, γ_L – swobodna energia powierzchniowa kleju, η – lepkość kleju, θ – kąt zwilżania.

Z zależności tej wynika bezpośrednio związek kąta zwilżania z czasem kontaktu cieczy z powierzchnią materiału. Jest to istotne, uwzględniając fakt, że kąt zwilżania jest traktowany jako praktyczna miara właściwości adhezyjnych materiałów.

Cechy te wpływają na energię rozpływu, jest to różnica między pracą adhezji i pracą kohezji. Pomijając w rozważaniach możliwość konstytuowania pracy kohezji w momencie zwilżania (np. poprzez stosowanie rozcieńczalników) energia rozpływu zależy bezpośrednio od wartości swobodnej energii powierzchniowej. Uwzględniając możliwości konstytuowania jej wartości zależność na wartość powierzchni czynnej można przedstawić następująco [15]:

$$S_{zw} = S_{rz} f\left(\frac{1}{\eta}, p, R_r, \sigma_w, H, t, E_r, m_i \right) \tag{3.14}$$

gdzie: η - lepkość środka wiążącego, p – ciśnienie w procesie utwardzania, R_r – wytrzymałość na rozciąganie materiałów łączonych, σ_w – naprężenia własne, H – twardość, t – czas, E_r – współczynnik sprężystości wzdłużnej materiałów łączonych, m_i – wektor bezwymiarowych współczynników określających związek cech stereometrycznych warstwy wierzchniej z parametrami wpływającymi na powierzchnię czynną.

Analiza funkcji (3.14) wskazuje na następujące, ważniejsze ustalenia:

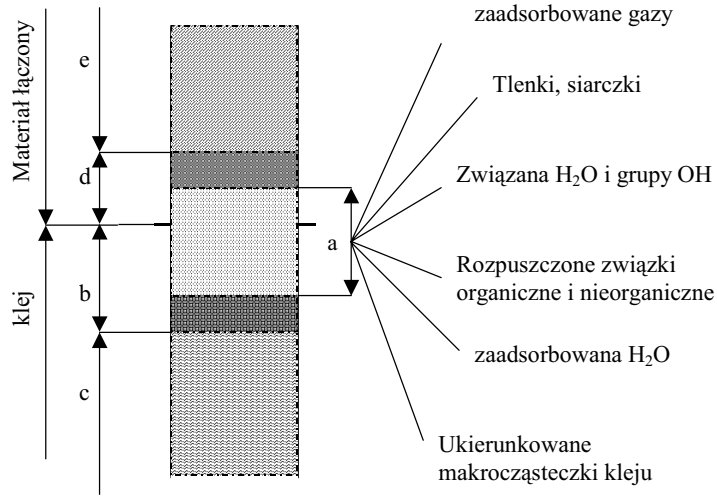
- największą powierzchnię zwilżania uzyskuje się wówczas gdy topografia powierzchni posiada strukturę rozwiniętą, a więc możliwie dużą powierzchnię rzeczywistą,
- powierzchnia czynna wzrasta wraz ze zmniejszaniem się lepkości środka wiążącego, lepkość zaś jest silnie uzależniona od temperatury i czasu,
- istotnym czynnikiem technologicznym jest ciśnienie, ogólnie wzrost ciśnienia sprzyja zwilżaniu,
- wzrost naprężeń własnych w warstwie wierzchniej powoduje zwiększenie swobodnej energii powierzchniowej, jest więc z punktu widzenia procesu zwilżania korzystny, pod warunkiem, że czynności w wyniku których nastąpił wzrost naprężeń własnych nie pogarszają w sposób istotny innych cech fizycznych, czy stereometrycznych warstwy wierzchniej mających wpływ na właściwości adhezyjne,
- wzrost sztywności i twardości warstwy wierzchniej materiałów łączonych to czynniki sprzyjające procesowi zwilżania, wynika to zarówno z wpływu tych czynników na wartość swobodnej energii powierzchniowej jak też ze wzrostu wytrzymałości mikronierówności na ściskanie,
- proces zwilżania zależy także od zmian chemicznych warstwy wierzchniej konstytuowanych w procesach obróbki, środowiska w którym formowane jest połączenie i innych, niekoniecznie obserwowalnych czynników w układzie, wpływ ten może być doraźny, ale też i długotrwały.

Adhezja właściwa, określana także jako specyficzna obejmuje siły adsorpcji fizycznej, chemisorpcji, a także wiązania wodorowe.

Teoria adhezji mechanicznej, historycznie pierwsza ze znanych teorii, sukcesywnie uzupełniana była o inne teorie, kiedy kolejne doświadczenia i analizy wykazały, że o siłach adhezji nie decydują wyłącznie siły pochodzące z zakotwiczeń mechanicznych. Adsorpcyjną teorię adhezji oparto na założeniu, że podstawę adsorpcji i adhezji stanowi różnica między stanem energetycznym cząsteczek na powierzchni cieczy lub ciał stałych i cząsteczek znajdujących się w głębi tych faz. Wielokrotnie też dowiedziono, że ważną rolę w teorii adhezji odgrywa chemisorpcja. Zakłada ona występowanie między klejem i podłożem adsorpcji chemicznej, dzięki grupom funkcyjnym zdolnym do tworzenia wiązań chemicznych.

W Polsce problematykę adhezji, a zwłaszcza problematykę klejenia w aspekcie teoretycznym i aplikacyjnym podjęto w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Szczególnie w ostatnich 30 latach notuje się istotny postęp w tym interdyscyplinarnym obszarze wiedzy. Z opracowań monograficznych warto wymienić między innymi prace J. Godzimirskiego, B. Jurkowskiego, J. Łunarskiego, R. Sikory, Z. Zaczka, M. Żenkiewicza, a także ich współpracowników.

Na podstawie sumowania sił adhezyjnych wszystkich wiązań nie można obliczyć wytrzymałości, ponieważ na powierzchni występują różnice natury chemicznej, strukturalnej oraz mikroefekty. Złącze adhezyjne w warunkach rzeczywistych jest heterogenicznym, złożonym układem, w sposób schematyczny jego strukturę przedstawiono na rysunku 3.9.



Rys. 3.9. Poglądowy model złącza adhezyjnego: a – strefa przejściowa, b – warstwa wierzchnia tworzywa, c – rdzeń tworzywa, d – warstwa wierzchnia metalu, e – rdzeń metalu [15]

Energia powierzchniowa [1, 2, 3] może być traktowana jako niewysycenie wiązań atomów leżących na powierzchni. Takie ujęcie energii sugeruje jednocześnie, że należy ona do struktury metalu i określa wartość energii którą można przypisać poszczególnym płaszczyznom krystalograficznym. Cechą charakterystyczną ciał krystalicznych jest anizotropia ich właściwości w tym anizotropia energii powierzchniowej.

Energia potrzebna do rozdzielenia dwóch płaszczyzn atomowych zmienia się wraz ze zmianą orientacji krystalograficznej.

Płaszczyzna zwarto-upakowana charakteryzuje się najniższą względną energią powierzchniową. Można to tłumaczyć rozkładem gęstości elektronowej na powierzchni metali. Z elektronowego punktu widzenia powierzchnia zwarto-upakowana jest powierzchnią względnie gładką. W przypadku płaszczyzny w periodycznie zmieniającym się rozkładzie elektronów, powierzchnia metali ma konfigurację na przemian zmieniających się wzgórz i dolin. Dodatnio naładowane zręby jonowe leżą nieco powyżej powierzchni, a ujemnie naładowane elektrony leżą poniżej.

Dlatego powierzchnia zwarto-upakowana charakteryzuje się niską energią powierzchniową, a bardziej „otwarta" płaszczyzna ma tą energię wyższą i jest bardziej reaktywna przy zetknięciu z inną fazą i zmiana gęstości elektronów na powierzchni ciała metalicznego przyczynia się do zmian reaktywności.

Bardzo ważną rolę w mechanizmie łączenia adhezyjnego odgrywają siły van der Waalsa, czyli siły zaliczane do adsorpcji fizycznej. Van der Waals sformułował równanie [21, 22]:

$$\left(p+\frac{an^2}{V^2}\right)(V-bn)=nRT \tag{3.15}$$

gdzie: p – ciśnienie, n – liczba moli, a – stała charakteryzująca siły przyciągania, V – objętość, b – stała charakteryzująca siły odpychania, R – uniwersalna stała gazowa, T – temperatura

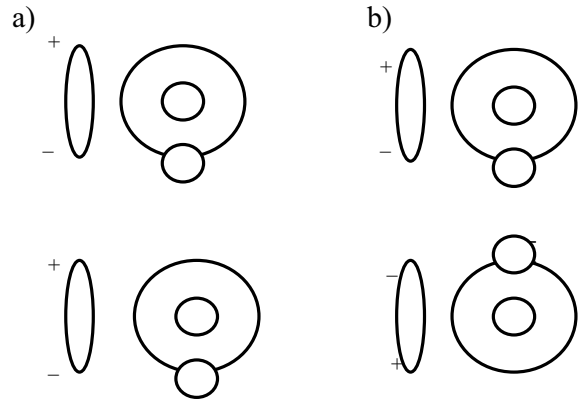
Teoria wyjaśniająca kompleks zjawisk zachodzących na granicy ciało stałeciecz (metal-polimer) oparta jest na analizie oddziaływań międzycząsteczkowych. Ważniejsze oddziaływania decydujące o sukcesie połączenia adhezyjnego są następujące:

1. Oddziaływania o charakterze mechanicznym.
2. Siły van der Waalsa:
   - oddziaływania dyspersyjne,
   - oddziaływania indukcyjne,
   - oddziaływania orientacyjne,
   - oddziaływania konformacyjne,
   - oddziaływania multipolowe.
3. Wiązania wodorowe.
4. Wiązania chemiczne.

Oddziaływania dyspersyjne (Londona)

Siły dyspersyjne – są wynikiem tworzenia dipoli elementarnych wskutek ruchu elektronów wokół jądra. Występują one nawet wówczas, gdy cząsteczka nie zawiera grup polarnych. Ideę ich powstania przedstawiono na rysunku 3.10.

Jest to model uproszczony, nie mniej jednak można przyjąć założenie, że każdy atom, ze względy na ruch elektronów wokół jądra, może być traktowany jako dipol o ciągle zmieniającym się momencie dipolowym. Siły dyspersyjne są addytywne i nie zależą od temperatury, wielkość ich rośnie ze wzrostem liczby elektronów zewnętrznych, liczby atomowej, długości łańcuchów cząsteczkowych i liczby grup funkcyjnych. Zależą one również w sposób bardzo silny od zbliżenia powierzchni ciał. Siły dyspersyjne odgrywają dużą rolę w procesach klejenia.



Rys. 3.10. Zasada powstawania sił dyspersyjnych: a) – przyciągających, b) – odpychających

Oddziaływania indukcyjne

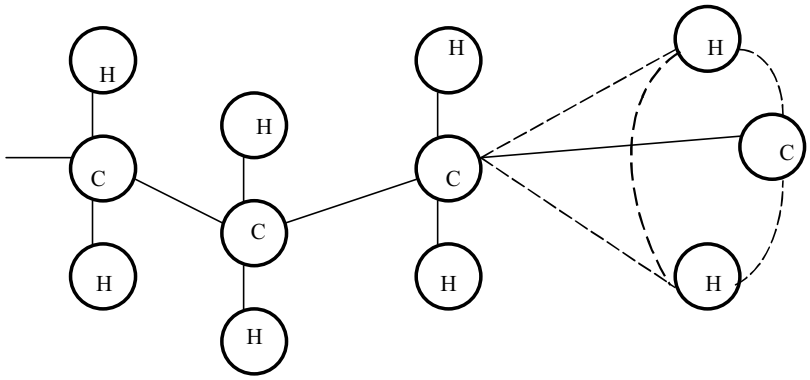
Specyfiką oddziaływań indukcyjnych jest to, że występują między cząsteczkami niepolarnymi i dipolami trwałymi. Jeżeli cząsteczka niepolarna znajdzie się dostatecznie blisko cząsteczki o trwałym momencie dipolowym wówczas jej elektrony oddziałują z każdym z biegunów dipola cząsteczki polarnej. W wyniku takiego oddziaływania w cząsteczce niepolarnej następuje asymetryzacja ładunku elektrycznego i cząsteczka staje się dipolem indukowanym. Siły te nazywane są siłami Debye'a. Ich znaczenie w procesach związanych z adhezją nie jest duże. Szacuje się, że ich udział nie przekracza 10% wartości sumarycznych oddziaływań między cząsteczkami.

Oddziaływania orientacyjne

Są to oddziaływania typu dipol trwały – dipol trwały. Mają one charakter oddziaływań orientacyjnych, nazywane są także siłami Keesoma. Siły oddziaływania cząstek o dipolach trwałych są to siły typu elektrostatycznego występujące między cząsteczkami w których ładunki elektryczne dodatnie i ujemne są rozmieszczone niesymetryczne). Zasięg tego typu sił wynosi ok. 40–50 nm. Jeżeli atomy wchodzące w skład cząsteczki mają różną elektroujemność wówczas elektrony gromadzą się w pobliżu atomu o większej elektroujemności. W efekcie w takiej cząsteczce następuje przesunięcie ładunku elektrycznego co prowadzi do momentu dipolowego którego wielkość zależy od wielkości ładunków i ich odległości. W złożonych cząsteczkach takich dipoli może być więcej, w rezultacie wzajemnych oddziaływań konstytuuje się moment wypadkowy. Oddziaływania te są zależne od temperatury. Charakterystyczne jest to, że zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna, gdyż ruchy cieplne cząsteczek zaburzają orientację dipoli.

Oddziaływania konformacyjne

Są one wynikiem zmian w położeniu atomów lub ich grup. Rotacja wokół wiązania oraz zmiana usytuowania przestrzennego atomów lub ich grup powodują różnice w stanie energetycznym cząsteczek. Siły te są addytywne z siłami dyspersyjnymi. Na rysunku 3.11 przedstawiono konformację na przykładzie rotacji łańcucha węglowodorowego.



Rys. 3.11. Przedstawienie konformacji na przykładzie rotacji łańcucha węglowodorowego [7]

Oddziaływania multipolowe

Oddziaływania multipolowe są z reguły pomijane ze względu na ich niewielkie znaczenie. Występują one powszechnie i wiążą się z problemem wewnętrznej kompensacji różnych składowych dipoli w cząsteczce.

Całkowita wartość sił Van der Waalsa

Całkowitą energię oddziaływania między dwiema cząsteczkami dipolowymi możemy wyrazić zależnością [5, 22]:

$$u(r)=\frac{b}{r^n}-\frac{1}{r^6}\left(\frac{\mu_1^2\mu_2^2}{kT}+\mu_1^2\alpha_2+\mu_2^2\alpha_1+\frac{3}{2}h\frac{\nu_1\nu_2}{\nu_1+\nu_2}\alpha_1\alpha_2\right) \qquad (3.16)$$

Składowe w nawiasie oznaczają oddziaływania: dipol-dipol, dipol-dipol indukowany i oddziaływania dyspersyjne.

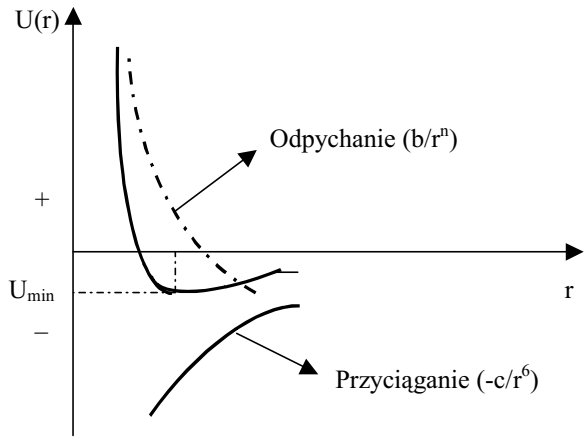
W formie skróconej zależność ta jest przedstawiana w postaci:

$$u(r)=\frac{b}{r^n}-\frac{c}{r^6} \qquad (3.17)$$

Często występuje w postaci potencjału 6 – 12 Leonarda-Jonesa [5]:

$$u(r) = \frac{b}{r^{12}} - \frac{c}{r^6} \tag{3.18}$$

Krzywą energii potencjalnej ilustrującą powyższą zależność przedstawiono na rysunku 3.12.



Rys. 3.12. Krzywa energii potencjalnej potencjału Leonarda-Jonesa [5]
U_{min} – najbardziej trwały stan między oddziaływującymi cząsteczkami

Różniczkując powyższe równanie względem odległości między jądrami atomów *r* otrzymujemy wartość siły oddziaływań międzycząsteczkowych *F* [22]:

$$F = -\frac{du(r)}{dr} = \frac{12b}{r^{13}} - \frac{6c}{r^7} \tag{3.19}$$

gdzie: *b* – stała odpychania, *c* – stała przyciągania (charakterystyczna dla danego rodzaju cząsteczek lub atomów).

Z zależności tej wynikają następujące przypadki:

- dla $r \rangle \left(\frac{2b}{c}\right)^{\frac{1}{6}}$ – między atomami występują siły przyciągania,
- dla $r = \left(\frac{2b}{c}\right)^{\frac{1}{6}}$ – następuje równowaga sił przyciągania i odpychania,
- dla $r \langle \left(\frac{2b}{c}\right)^{\frac{1}{6}}$ – między atomami występują siły odpychania.

Nie negując znaczenia sił Van der Waalsa w teorii adhezji należy zwrócić uwagę na wiązania chemiczne, które są około 100 razy większe od sił międzycząsteczkowych. To właśnie wiązania chemiczne zapewniają bardzo wytrzymałe połączenia i są mniej podatne na desorpcyjne działanie czynników dyfundujących na granicy faz. Niezawodność w długotrwałej eksploatacji połączeń klejowych jest między innymi uwarunkowana występowaniem wiązań chemicznych.

Wiązania wodorowe

Jest to szczególny typ oddziaływań z udziałem atomu wodoru i dwóch atomów elektroujemnych X i Y. Schematycznie można to przedstawić następująco: X-H—Y. Wiązanie X-H (np. O-H) jest wiązaniem kowalencyjnym. Jego długość wynosi ok. 0,1 nm. Odległość H-Y wynosi ok. 0,176 nm i jest mniejsza niż suma promieni van der Waalsa tlenu i wodoru, wynosi ona około 0,26 nm. Długość wiązania wodorowego jest więc pośrednia między długością wiązania kowalencyjnego a sumą promieni van der Waalsa. Energia wiązań wodorowych zawiera się w granicach 15 – 50 kJ/mol i jest większa od oddziaływań van der Waalsa, ale jednocześnie mniejsza od energii wiązań kowalencyjnych.

Wiązania chemiczne

Siły te są następstwem przebudowy struktury atomowej łączonych powierzchni w wyniku ich zbliżenia geometrycznego. W wyniku takiego zbliżenia mogą powstawać wiązania kowalencyjne, jonowe, wodorowe i donorowo-akceptorowe. Szczególnie wysokoenergetyczne są wiązania kowalencyjne (400 – 600) kJ/mol i wiązania jonowe (200 – 400) kJ/mol.

Formułowane są także inne teorie adhezji, ich znaczenie jest mniejsze, wymienić tu należy przede wszystkim teorię adhezji elektrycznej i dyfuzyjnej.

Siły oddziaływania w teorii adhezji elektrycznej są wynikiem oddziaływania cieczy i powierzchni ciała, powstają w wyniku różnych prac wyjścia elektronów, w efekcie czego następuje przechodzenie elektronów z jednego materiału na drugi. W wyniku tego jedna z warstw staje się względnie uboższa w elektrony, co prowadzi do powstania podwójnej warstwy elektrycznej powodującej efekt przyciągania (podobnie jak okładki kondensatora).

Teoria ta ma jednak ścisły związek z teorią adsorpcyjną, gdyż przejścia elektronów wywołuje orientowaną adsorpcję grup polarnych kleju na powierzchni ciała łączonego co jest ściśle związane z obecnością i ilością grup polarnych**.**

Teoria dyfuzyjna może być wykorzystywana do interpretacji zjawisk wyłącznie w połączeniach, w których klej przynajmniej częściowo rozpuszcza materiał podłoża. Takie połączenia występują przy łączeniu niektórych tworzyw sztucznych.

3.2.2. Adhezja w ujęciu molekularno-kinetycznym

W opisie molekularnym posługujemy się modelami atomów i cząsteczek, uwzględniającymi budowę cząsteczkową kleju, zachowanie się makrocząsteczek w warstwie granicznej i ich wzajemne oddziaływanie. Modele molekularne zawsze obciążone są pewnymi uproszczeniami. Analiza molekularno-kinetyczna zakłada, że nośność połączenia adhezyjnego jako całości jest sumą wzajemnych oddziaływań kleju i powierzchni na którą nałożono klej:

$$W = \sum_{i=1}^{k_0} F_i n_i \tag{3.20}$$

gdzie: k_0 – liczba typów oddziaływań, F_i – siła wiązania i-tego typu,
$n_i = 0,1,2,3,...$ liczba wiązań i-tego typu.

Analiza molekularno-kinetyczna pozwala lepiej zrozumieć wiele zjawisk związanych z adhezją, jednak jej przydatność do prognozowania wytrzymałości połączeń klejowych jest ograniczona. Granica faz jest układem szczególnym, którego właściwości są funkcją wielu czynników, a zwłaszcza oddziaływań międzycząsteczkowych. Wpływ na adhezję może być rozpatrywany na poziomie atomowym cząsteczkowym i nadcząsteczkowym. W tabeli 3.1 przedstawiono związek wybranych parametrów struktury atomowej z właściwościami adhezyjnymi warstwy wierzchniej.

Właściwości adhezyjne mogą być konstytuowane na różnych poziomach struktury. W sposób syntetyczny ważniejsze czynniki wpływające na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej rozpatrywane na różnych poziomach struktury przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.1. Związek wybranych parametrów struktury atomowej z właściwościami adhezyjnymi warstwy wierzchniej [16]

Parametr struktury atomowej	Energia warstwy wierzchniej E_w
Praca wyjścia elektronów	↑
Promień atomowy	↓
Stała sieci	↓ ↓
Liczba elektronów swobodnych	↑
Potencjał jonizacji (elektroujemność)	↑
Polaryzowalność	↑

Tabela 3.2. Ważniejsze czynniki wpływające na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej rozpatrywane na różnych poziomach struktury [16]

Ważniejsze czynniki	Poziom oddziaływania		
	atomowy	cząsteczkowy i nadcząsteczkowy	makroskopowy
	promień atomu	kąty między wiązaniami	napełniacze
	stała sieci	konformacja	nośniki
	liczba elektronów swobodnych	konfiguracja	dodatki modyfikujące (barwniki, stabilizatory i inne)
	praca wyjścia elektronów	struktury drugorzędowe	inżynieria warstwy wierzchniej

Z praktycznego punktu widzenia największe znaczenie ma oddziaływanie na poziomie makroskopowym, a szczególnie inżynieria warstwy wierzchniej.

3.2.3. Adhezja w ujęciu termodynamicznym

Powierzchnia ciała stałego jest heterogeniczna ze względu na chropowatość i skład chemiczny. Ma to ścisły związek z procesami adsorpcji i adhezji. Powierzchnię można charakteryzować krystalograficznie, topograficznie lub chemicznie. Każdy z tych czynników ma ścisły związek z konstytuowaniem właściwości adhezyjnych. Charakterystyka krystalograficzna dotyczy położenia atomów i cząsteczek ciała stałego, na powierzchni najczęściej eksponowane są obszary o różnej orientacji krystalograficznej, a więc mamy do czynienia z polikrystalicznością. Prowadzi to w konsekwencji do niejednorodności energetycznej.

Powierzchnie chemicznie czyste praktycznie nie występują. Nawet w warunkach próżni uzyskanie powierzchni chemicznie czystej nie jest procesem łatwym, gdyż nie daje się do końca usunąć zaadsorbowanych na powierzchni zanieczyszczeń. Skład chemiczny fazy przejściowej jest różny od składu fazy wewnętrznej (objętościowej). Związek tak rozumianego składu chemicznego z właściwościami energetycznymi powierzchni jest oczywisty.

Charakterystyka topograficzna dotyczy przede wszystkim tzw. „rozwijania" powierzchni. W wyniku procesów adsorpcji cząsteczki kleju na powierzchni ciała stałego tracą swobodę ruchu, to znaczy, że ich entropia maleje, maleje również energia swobodna Gibbsa. W procesie adsorpcji biorą udział siły fizyczne i chemiczne, stąd rozróżnia się adsorpcję fizyczną i adsorpcję chemiczną. Adsorpcja fizyczna jest procesem odwracalnym jako rezultat oddziaływań van der Waalsa, a zaadsorbowane cząstki mogą poruszać się po powierzchni ruchem translacyjnym.

Chemisorpcja jest wynikiem tworzenia się wiązań chemicznych między cząsteczkami kleju i cząsteczkami powierzchniowymi materiału łączonego. Wiązania w zależności od kleju mogą być jonowe lub koordynacyjne. Adsorpcja chemiczna jest poprzedzona adsorpcją fizyczną.

Analiza molekularno-kinetyczna problemów adhezji, a więc analiza „siłowa", jak już wspomniano nie jest wygodna w praktyce. Powszechnie dziś przyjmuje się, że analiza energetyczna jest najbardziej praktyczna. Podstawowe pojęcia związane z analizą problemu to napięcie powierzchniowe i swobodna energia powierzchniowa. W wielu pracach, nawet w specjalistycznej literaturze, pojęcia te traktowane są jako synonimy. Nie wdając się bliżej w istotę problemu należy stwierdzić, że napięcie powierzchniowe s jest równe energii powierzchniowej tylko dla cieczy jednoskładnikowej. W ogólnym przypadku można napisać [21]:

$$\sigma = F + S\left(\frac{dF}{dS}\right)_T \tag{3.21}$$

gdzie: F – swobodna energia powierzchniowa, S – powierzchnia, T – temperatura.

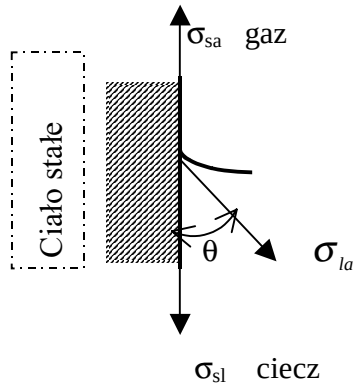
Dla cieczy $S(dF/dS)_T = 0$, natomiast dla ciał stałych F i $S(dF/dS)$ są wielkościami podobnego rzędu, stąd utożsamianie tych wielkości jest niekonsekwencją, tym bardziej, że jednostka w jakiej wyraża się napięcie powierzchniowe [N/m] jest wielkością wektorową, a jednostka energii powierzchniowej jest skalarem.

W dużym uproszczeniu możemy przyjąć, że swobodna energia powierzchniowa określa siłę wiązania elektronów w atomach materiału powierzchni, czyli inaczej zdolność tych elektronów do oddziaływania z sąsiednimi atomami powierzchni. Miarą energii powierzchniowej jest praca, którą trzeba wykonać aby przenieść atomy lub cząsteczki z wnętrza ciała na jego powierzchnię.

Z doświadczeń wynika, że między kątem zwilżania, a napięciem powierzchniowym istnieje w przybliżeniu zależność liniowa.

Adhezję i zwilżanie charakteryzują takie wielkości termodynamiczne jak napięcie powierzchniowe na granicy ciecz–gaz σ_{la}, na granicy ciało stałe–ciecz σ_{sa}, swobodna energia powierzchniowa γ_{SC} i graniczny kąt zwilżania Θ. Wartości kąta granicznego nie można przyjmować jako wskaźnik jednoznaczny, gdyż zależy on od właściwości stykających się faz, zanieczyszczeń, domieszek, chropowatości powierzchni i innych czynników. Oddziaływanie cieczy z powierzchnią ciała stałego charakteryzuje praca adhezji (rys. 3.13).

Z analizy zwilżania ciał stałych przez ciecz wynika znane równanie Younga [15, 22]:

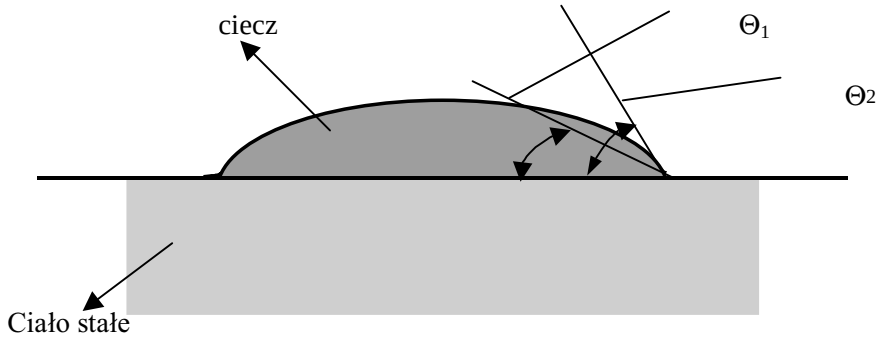


Rys. 3.13. Rysunek pomocniczy do analizy procesu zwilżania ciał stałych przez ciecz

$$\frac{\sigma_{sa} - \sigma_{sl}}{\sigma_{la}} = \cos\theta \tag{3.22}$$

gdzie: $\sigma_{sa} = (dF/dS_{sa})_{T,m}$, $\sigma_{sl} = (dF/dS_{sl})_{T,m}$, $\sigma_{la} = (dF/dS_{la})_{T,m}$,

przedstawiają odpowiednie pochodne cząstkowe energii Helmholtza, T – temperatura, μ – potencjał chemiczny. Równanie Younga w sposób przybliżony opisuje stan równowagi termodynamicznej, nie uwzględnia bowiem makro- i mikrokąta zwilżania. Kąty te w sposób poglądowy przedstawiono na rysunku 3.14.



Rys. 3.14. Uproszczony model zwilżania ciała stałego przez ciecz z uwzględnieniem makro- i mikrokąta zwilżania

Uwzględnienie w analizie energetycznej mikro- i makrokąta zwilżania komplikuje nieco termodynamiczną analizę procesu zwilżania, często aspekt ten jest pomijany. Pomiędzy kątem zwilżania a napięciem powierzchniowym istnieje,

jak wykazują badania, zależność w przybliżeniu liniowa, choć zależność ścisła występuje w zasadzie tylko przy zwilżaniu danego materiału cieczami należącymi do jednego szeregu homologicznego.

Modyfikacji równania Younga dokonał A. Dupre [5, 15, 22] wprowadzając bardzo ważne pojęcie pracy adhezji W_{ad}:

$$W_{ad} = \sigma_{sa} + \sigma_{la} - \sigma_{sl} \tag{3.23}$$

Należy zauważyć, że powszechnie stosowane równanie Younga nie uwzględnia zmian energii powierzchniowej, wzajemnego rozpuszczania komponentów na granicy faz i zmiany ich potencjałów chemicznych. W ujęciu praktycznym równanie Dupre-Younga przedstawiane jest w postaci:

$$W_{ad} = \sigma_{la}(1+\cos\Theta) \tag{3.24}$$

Do wyznaczana jednostkowej pracy adhezji można posłużyć się zależnością [21]:

$$W_{ad} = -\frac{0{,}6A}{\Pi H^2} \tag{3.25}$$

gdzie: A – stała van der Waalsa, H – odległość między stykającymi się materiałami.

Jest to zależność dość kłopotliwa w zastosowaniach ze względu na trudności w określaniu wielkości H. W zasadzie najbardziej prawidłowe byłoby przyjęcie średniej odległości międzyatomowej materiałów klejonych i kleju, nie jest to proste, jeżeli uwzględnimy często złożoną budowę chemiczną zarówno kleju jak i materiałów łączonych.

Stosunek pracy adhezji W_a (rozdzielenie faz na granicy ciało stałe–ciecz) do pracy kohezji W_k (rozdzielenia faz na granicy ciecz–ciecz) oznacza pracę względną adhezji cieczy W_{wa}:

$$W_{wa} = \frac{W_a}{W_k} \tag{3.26}$$

Wielkość adhezji określa się pracą potrzebną do rozłączenia przywierających ciał przypadającą na jednostkę powierzchni.

Istnieje wiele innych związków określających swobodną energię powierzchniową i pracę adhezji, między innymi w funkcji promienia atomowego, momentu dipolowego, stałej sieci, wytrzymałości na rozciąganie, potencjału jonizacji i innych wielkości, wydaje się jednak, że pomimo pewnych uproszczeń równanie Dupre-Younga jest najwygodniejsze w zastosowaniach praktycznych. Decyduje o tym zwłaszcza jego energetyczny a nie siłowy charakter. W analizie połączeń adhezyjnych ważny jest związek między pracą adhezji i pracą kohezji.

Praca kohezji jest energią jaką należy dostarczyć do układu, aby pokonać wzajemne oddziaływanie cząsteczek i doprowadzić do ich rozdzielenia. Tworzą się wówczas dwie nowe powierzchnie, należy więc wykonać pracę równą podwójnej wartości energii powierzchniowej:

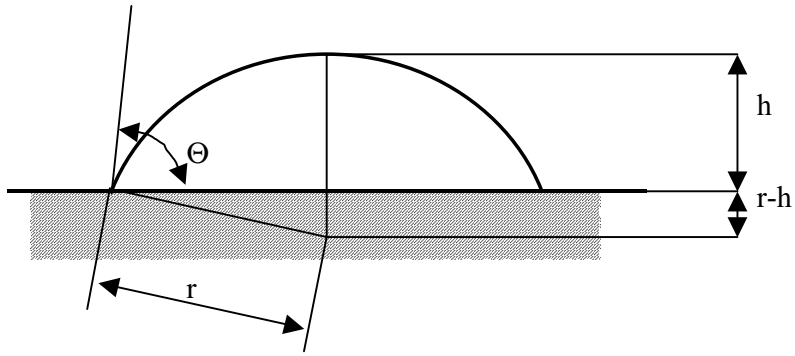
$$W_k = 2\sigma_{la} \tag{3.27}$$

Warunek ten także wynika bezpośrednio z równania Dupre-Younga dla $\theta = 0$, a więc dla idealnego rozpływu. Na powierzchniach rzeczywistych zjawisko idealnego rozpływu nie występuje, stąd praca adhezji jest zawsze mniejsza od pracy kohezji. Różnica między pracą adhezji i pracą kohezji jest pracą lub energią rozpływu.

Kąt zwilżania można określić przez pomiar bezpośredni lub pośrednio przez pomiar niektórych wymiarów geometrycznych kropli. Wymiary te przedstawiono na rysunku 3.15. Warto jednak zauważyć, że w metodzie pośredniej przyjmuje się założenie, że kształt kropli odpowiada fragmentowi kuli. Taki postulat jest słuszny tylko dla określonej objętości kropli.

Kąt zwilżania Θ w oparciu o rysunek 3.15 można obliczyć z następującej zależności:

$$\cos\Theta = \frac{r}{r-h} \tag{3.28}$$



Rys. 3.15. Oznaczenia do obliczania kąta zwilżania z wymiarów geometrycznych kropli

Swobodna energia powierzchniowa jest to różnica pomiędzy całkowitą energią wszystkich atomów lub cząsteczek warstwy powierzchniowej, a energia którą by one miały znajduje się we wnętrzu ciała (rys. 3.7)**.**

Miarą energii powierzchniowej jest praca którą trzeba wykonać aby przenieść atomy lub cząsteczki z wnętrza ciała na jego powierzchnię. Energia

powierzchniowa w stanie krytycznym równa się zeru, gdyż zanika różnica między fazami, a więc zanika i powierzchnia.

Energię powierzchniową definiuje się jako energię atomów lub cząsteczek w warstwie powierzchniowej, lecz nie jest to jednak sformułowanie precyzyjne, gdyż energia atomów warstwy powierzchniowej rośnie wraz ze wzrostem temperatury, a energia powierzchniowa E_p maleje i w temperaturze krytycznej ma wartość równą zeru:

$$\sigma_T = \sigma_o(T_K - T - a) \tag{3.29}$$

gdzie: a – wartość stała, T_K – temperatura krytyczna, σ_o – napięcie powierzchniowe w temperaturze odniesienia, T – rozpatrywana temperatura.

Powierzchnia ciał stałych krystalicznych różni się tym od powierzchni cieczy, że jej atomy lub cząsteczki mają bardziej ograniczoną swobodę poruszania się cząsteczek powierzchniowych, gdyż są one „uwięzione" w siatce krystalicznej i nie mają swobody ruchu. Wzrost temperatury powoduje wzrost ruchliwości cząsteczek lub atomów powierzchniowych. Przy podgrzaniu ciała stałego do temperatury topnienia wzrasta gwałtownie ruchliwość atomów powierzchniowych, a następnie występuje ich wzmożona dyfuzja w kierunku rdzenia ciała stałego. W temperaturze, w której występuje pewna ruchliwość atomów istnieje tendencja do wyrównywania energii w obszarach, w których osiąga ona dużą wartość np. w porach, mikroszczelinach oraz występach i miejscach o dużej krzywiźnie.

Przykładem ruchliwości atomów może być zjawisko spiekania proszków metali w temperaturze zbliżonej do temperatury topnienia i pod działaniem podwyższonego ciśnienia.

Warstwa wierzchnia ciała stałego pozostaje w stanie pewnego naprężenia wynikającego z nierównomiernego rozkładu sił działających na atomy powierzchniowe, powodującego zazwyczaj przesunięcia ich położenia w siatce krystalicznej.

Różnorakie sposoby obróbki powierzchni lub oddziaływań na powierzchnię czynników zewnętrznych mogą ten stan naprężeń zwiększyć lub zmniejszyć. Wzrost naprężeń powoduje wzrost energii powierzchniowej.

Na stan energetyczny powierzchni fizycznej wpływa skład chemiczny, struktura oraz przebieg i warunki procesu technologicznego jej otrzymywania. Konstytuują one strefę przypowierzchniową. Stan ten nie jest jednorodny, bowiem wskutek różnego usytuowania makrocząsteczek, cząsteczek i atomów oraz różnych defektów strukturalnych, jedne z nich będą mniej inne bardziej wysycone energetycznie. Zatem na powierzchni ciała stałego znajdują się obszary o różnej aktywności energetycznej, przy czym elementy słabo związane są bardziej aktywne powierzchniowo.

Adhezję pomiędzy cieczą i ciałem stałym konstytuuje się różnymi sposobami, które można podzielić na następujące grupy:

- przygotowanie warstwy wierzchniej materiału,
- modyfikacja chemiczna i fizyczna cieczy,
- warunki kontaktu cieczy z ciałem.

Przygotowanie warstwy wierzchniej materiału polega na: usunięciu zewnętrznych powłok adsorpcyjnych strefy przypowierzchniowej, powleczenie powierzchni rzeczywistej materiału odpowiednimi substancjami lub wytworzeniu na tej powierzchni żądanych powłok bądź na odpowiednim łączeniu tych zabiegów.

Powłoki adsorpcyjne usuwa się poprzez obróbkę skrawaniem, w czasie której ulega usunięciu na ogół część warstwy wierzchniej materiału i zostaje wytworzona nowa warstwa, charakteryzująca się przede wszystkim bardzo małą chropowatością. Jako obróbkę skrawaniem stosuje się więc szlifowanie wykańczające, polerowanie ścierne, elektropolerowanie itp. Substancje, którymi powleka się powierzchnie noszą nazwę środków rozdzielających (środków antyadhezyjnych). Pospolitymi środkami antyadhezyjnymi są różnego rodzaju woski i oleje silikonowe.

Oddzielenie cieczy od ciała stałego następuje zatem w obszarze środka rozdzielczego. Jeżeli adhezja występuje jako czynnik pożądany, to strefa, w której następuje oddzielenie (cieczy z ciałem stałym) zależy w istocie od tych samych czynników co poprzednio, z tym, że stosuje się inne sposoby usuwania zewnętrznych powłok adsorpcyjnych strefy przypowierzchniowej i wytwarzania na powierzchni rzeczywistej żądanych powłok.

Wytworzona warstwa wierzchnia powinna charakteryzować się przede wszystkim znacznie większą chropowatością powierzchni. Stosuje się obróbkę strumieniowo-ścierną, zwłaszcza piaskowanie bezpyłowe, obróbkę luźnym ścieraniem w pojemnikach, szlifowanie zgrubne oraz różne narzędzia ślusarskie takie jak papier ścierny, pilnik, skrobak itp.

Podczas obróbki skrawaniem nie zostają jednak usunięte w dostatecznym stopniu niektóre powłoki adsorpcyjne, np. tłuszcze. Dlatego w celu usunięcia tych powłok w jak największym stopniu, stosuje się dodatkowo zmywanie rozpuszczalnikami organicznymi, takimi jak: aceton, benzyna ekstrakcyjna, metyloetyloketon i inne. W niektórych przypadkach stosuje się obróbkę chemiczną, np. trawienie kwasem siarkowym, chromowym, solnym, azotowym w różnej temperaturze, proporcjach i stężeniach, bądź metody elektrochemiczne.

Energia powierzchniowa może być traktowana jako niewysycenie wiązań atomowych atomów leżących na powierzchni. Takie ujęcie energii sugeruje jednocześnie, że należy ona do struktury metalu i określoną wartość energii można przypisać poszczególnym płaszczyznom krystalograficznym. Cechą charakterystyczną ciał krystalicznych jest anizotropia ich własności w tym anizotropia energii powierzchniowej.

3.2.4. Znaczenie adhezji w procesie scalania drobnoziarnistych odpadów metalowych

Warto zauważyć, że właściwości takiego układu w dużym stopniu zależą od efektywnej grubości warstewki granicznej, można ją określić z zależności:

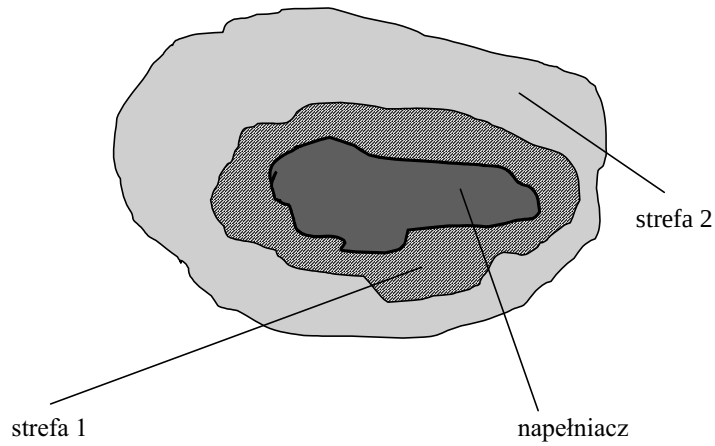
$$\delta = \frac{V}{s} \tag{3.30}$$

gdzie: V – objętość fazy rozpraszającej, s – łączna powierzchnia napełniacza.

W tym kontekście można mówić o stężeniu granicznym czyli stężeniu gdzie cała masa fazy rozpraszającej została wykorzystana do utworzenia monowarstwy fazy rozpraszającej. Przekroczenie granicznego stopnia napełnienia powoduje utratę ciągłości kompozytu z wszystkimi tego negatywnymi konsekwencjami. Od udziału objętościowego napełniacza zależą między innymi:

- współczynnik sprężystości podłużnej,
- wytrzymałość,
- lepkość,
- stopień zdyspergowania.

Należy zdawać sobie sprawę ze złożoności mechanizmu oddziaływania napełniacza i matrycy. Szczególnie ważne są mechanizmy oddziaływania na granicy faz napełniacz–matryca. Jeżeli na etapie przygotowania kompozytu matryca ma charakter cieczy ważne są mechanizmy adsorpcji fizyczne i chemicznej. Mogą one aktywnie wpływać na strukturę i właściwości strefy przyściennej (wokół cząstek napełniacza) matrycy (rys. 3.16).



Rys. 3.16. Umowne strefy aktywnego oddziaływania napełniacza na strukturę matrycy

Pierwsza strefa jest pod wpływem silnego oddziaływania napełniacza, w przypadku matrycy polimerowej obserwuje się w niej silną orientację makrocząsteczek. W strefie drugiej efekty oddziaływania są słabsze, nie mniej jednak zasięg tych zmian może sięgać nawet 0,5 mm.

Lepkość gwałtownie zwiększa się po przekroczeniu pewnej granicy zawartości napełniacza. Ta graniczna wartość występuje wówczas, gdy nastąpi utrata ciągłości matrycy polimerowej. Występują wówczas aglomeraty napełniacza które zdecydowanie zmieniają właściwości kompozytu. Zjawiska adsorpcji wpływają na orientację makrocząsteczek (dla matryc polimerowych). W zależności od wielkości różnicy pomiędzy siłami kohezji matrycy i adhezji na granicy faz napełniacz–matryca, mogą następować przemieszczenia masy polimeru w określonych kierunkach. Następuje więc albo zagęszczenie albo rozrzedzenie struktury polimeru w strefie przyściennej. Może to przemieszczać struktury nadcząsteczkowe tworząc niespójność w strefie przyściennej lub przejściowej. Uwzględniając orientacyjne oddziaływanie napełniacza na strukturę strefy przyściennej matrycy należałoby oczekiwać, że najlepszy efekt wzmocnienia wystąpi w przypadku gdy cała masa matrycy utworzy warstwę przyścienną, zakładając, że nie wystąpią aglomeraty napełniacza. Należy zdawać sobie jednak sprawę, że obecność zróżnicowanej energetycznie fazy zbrojącej, często z defektami powierzchniowymi [13, 19] sprzyja generowaniu nieciągłości struktury w strefie przyściennej, a więc ma działanie osłabiające.

Efekt wzmocnienia napełniaczem można uzyskać poprzez poprawę adhezji między napełniaczem i matrycą oraz zmianę właściwości cienkiej warstewki matrycy. Oceniając właściwości kompozytów najczęściej przyjmuje się postulat liniowej addytywności właściwości fizycznych komponentów

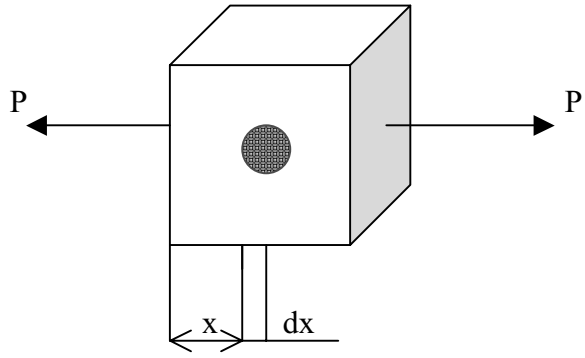
$$Y = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \ldots \tag{3.31}$$

gdzie: $X_1,X_2,...,X_n$ – udziały objętościowe składników kompozytu,
$C_1,C_2,...,C_n$ – właściwości fizyczne tych składników.

Przyjmując układ elementarny o wymiarach jednostkowych jak na rysunku 3.17, odpowiednie przekształcenia pozwalają średni współczynnik sprężystości podłużnej zapisać w postaci [19]:

$$\frac{1}{E} = \int_0^1 \frac{dx}{E_m + (E_f - E_m)A_f} \tag{3.32}$$

gdzie: A_f – powierzchnia przekroju fazy dyspersyjnej, A_m – powierzchnia przekroju osnowy.



Rys. 3.17. Elementarny układ osnowa-ziarno obciążone siłą P

Właściwości układu dyspersyjnego wzmacnianego cząstkami są definiowane przede wszystkim następującymi parametrami:

- adhezja do napełniacza,
- porowatość,
- przewodność cieplna,
- rozmiary cząstek,
- wytrzymałość,
- zwilżalność.

Miarą jakości kompozytu jest stabilność i powtarzalność właściwości [12]. Zależy to w dużym stopniu od procesu rozdrabniania i mieszania komponentów.

Zjawiska międzyfazowe związane z adsorpcją wpływają na właściwości strefy przyściennej. Dobre właściwości adhezyjne napełniacza pozytywnie wpływają na kształtowanie właściwości kompozytu, słabe właściwości osłabiają wytrzymałość i spójność kompozytu.

3.3. Piśmiennictwo

1. Adams R.D., Wake W.C.: Structural Adhesive Joints In Engineering. Elsevier Applied Science Publishers, London and New York 1984.
2. Burakowski T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1992.
3. Cagle Ch.V.: Kleje i klejenie. WNT, Warszawa 1997.
4. Dawydienko W.I., Wołkomorow W.I., Murowicz W.I.: K woprosu wlianija napołnitiela na procznostnyje swojstwa tiermoreaktywnych polimierow. Miechanika Polimierow 1/1973.

5. Dutkiewicz E.T.: Fizykochemia powierzchni. WNT, Warszawa 1998.
6. Godzimirski J.: Analiza wytrzymałości połączeń klejowych elementów metalowych obciążonych statycznie. Biuletyn WAT, 1813, Warszawa 1988.
7. Hebda M.,Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
8. Hryniewicz M.: Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, seria Rozprawy i Monografie, nr 58, Kraków 1997.
9. Hryniewicz M., Borowski G., Kuczmaszewski J.: Badania nad sposobem utylizacji materiałów poszlifierskich przemysłu łożyskowego. Materiały VII Międzynarodowej Konferencji „Recyklace Odpadu", Ostrawa 2003.
10. Hyla I., Śleziona J.: Kompozyty. Elementy mechaniki i projektowania. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2004.
11. Hyla I.: Tworzywa sztuczne. Własności-przetwórstwo-zastosowanie. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2004.
12. Jurkowski B., Jurkowska B.: Sporządzanie kompozycji polimerowych. Elementy teorii i praktyki. WNT, Warszawa 1995.
13. Kaczmar J.W.: Spiekane materiały kompozytowe uzyskiwane w procesie mechanicznego wytwarzania stopów i wyciskania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
14. Kuczmaszewski J.: Technologia śmigłowców. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1990.
15. Kuczmaszewski J.: Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1995.
16. Kuczmaszewski J.: Some methodological problems in assessing the adhesive properties of surfach layers of plastics. International Polymer Science and Technology, Vol. 29, No 5, 2002.
17. Lewicki P.P. (red): Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego. WNT, Warszawa 1990.
18. Sikora R.: Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992.
19. Szczepański: Przeróbka plastyczna materiałów spiekanych z proszków i kompozytów, Wyd. AGH, Kraków, 2003.
20. Van der Poel C.: On the Rheology of Concentrated Dispersions. Rhelogica Acta 1, 198/1958.
21. Wakuła W. Ł., Pritikin Ł.M.: Fiziczieskaja chimija adgiezji polimerow. Moskwa, Chimija 1984.
22. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.

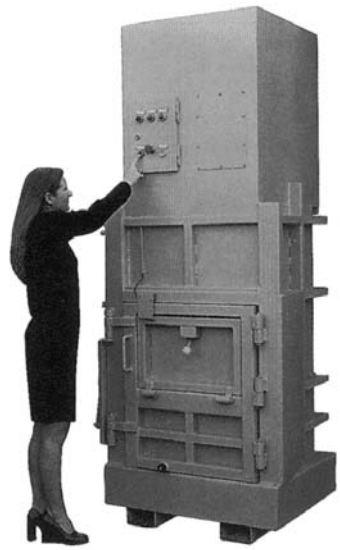
4. PRASY DO BRYKIETOWANIA METALOWYCH ODPADÓW DROBNOZIARNISTYCH

Konieczność zagospodarowania wielu różnorodnych metalowych odpadów drobnoziarnistych wymaga zastosowania odpowiednich urządzeń, z których najważniejsze są prasy do scalania tych materiałów. Stosuje się głównie prasy stemplowe i walcowe. Wybór rodzaju maszyny zależy od typu i właściwości odpadu oraz potrzeb i możliwości przedsiębiorcy.

4.1. Prasy stemplowe

Zalety stosowania pras stemplowych to: niskie koszty zakupu i eksploatacji, łatwość obsługi, wysoka trwałość, łatwość uzyskania brykietów o jednorodnej strukturze. Wadami tego urządzenia są: niska wydajność, duży koszt wytworzenia brykietu, duża energochłonność, uzyskane brykiety posiadają ostre krawędzie. Prasy stemplowe mają zastosowanie w małych zakładach produkcyjnych, gdzie nie występuje konieczność ciągłego przetwarzania odpadów w brykiety [6]. Poniżej przedstawiono na rysunkach wybrane typy maszyn wraz z opisem technicznym.

Zgniatacz odpadów (rys. 4.1) – służy do zgniatania drobnych elementów metalowych, wiórów metalowych oraz odpadów poszlifierskich. Charakterystyczne



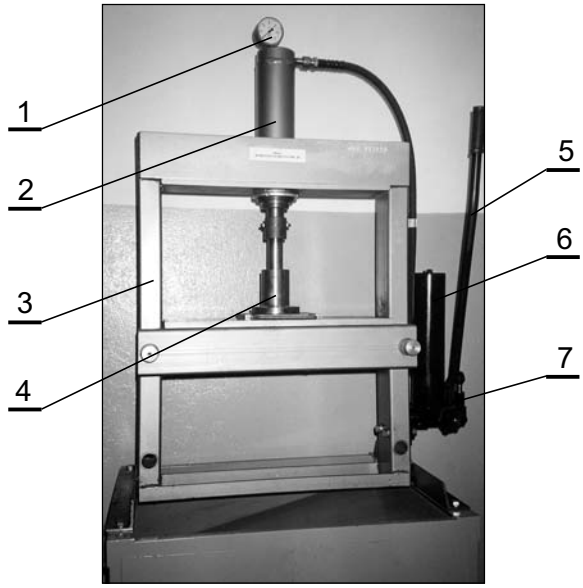
Rys. 4.1. Zgniatacz (KK Balers Polska Sp. z o.o.) [7]

parametry prasy to: nacisk – od 25 do 50 ton, pobór mocy – 3 kW, czas cyklu pracy – 35 s, pojemność pojemnika – 200 l, masa urządzenia – 600 kg.

Laboratoryjna brykieciarka stemplowa RUF 2,2/2500/60 (rys. 4.2) – wykorzystywana do brykietowania metalowych odpadów drobnoziarnistych. Maksymalne ciśnienie prasowania wynosi 2500 kg/cm^2, średnica brykietu – 60 mm, wysokość brykietu – 30÷80 mm, wydajność – 2 brykiety/min. Istnieje możliwość usuwania części cieczy z brykietów.

Rys. 4.2. Laboratoryjna brykieciarka stemplowa RUF 2,2/2500/60 [8]

Laboratoryjna prasa hydrauliczna PH-20 (rys. 4.3) – służy do brykietowania wysuszonych i rozdrobnionych odpadów poszlifierskich. Nacisk jednostkowy stempla wynosi 10÷30 MPa, przemieszczenie stempla – 200 mm, średnica brykietu – 30÷40 mm, wysokość brykietu – 20÷50 mm, wydajność – 2 brykiety/min. Matryca umożliwia uzyskanie brykietów o walcowym kształcie (rys. 4.4). W matrycy (2) znajdują się otwory umożliwiające odprowadzenie nadmiaru pozostałej w materiale odpadowym wody. Stosowanie przeciwstempla (3) ma na celu uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu naprężeń. Sprasowany wyrób opuszcza matrycę w jej dolnej części po usunięciu przeciwstempla i podstawy (4) oraz wypchnięciu za pomocą stempla (1). Istnieje możliwość szybkiej wymiany matryc i stempli w celu uzyskania brykietów o innych wymiarach i kształtach.



Rys. 4.3. Laboratoryjna prasa hydrauliczna PH-20 [1]: 1 – manometr, 2 – siłownik, 3 – rama, 4 – zespół formujący, 5 – dźwignia, 6 – zbiornik oleju, 7 – zawór spustowy

Rys. 4.4. Zespół formujący w prasie PH-20 [1]

4.2. Prasy walcowe

Początkowo prasy walcowe (brykieciarki) projektowano i wykonywano dla ściśle określonych materiałów drobnoziarnistych. W miarę upływu czasu powstało szereg uniwersalnych rozwiązań konstrukcyjnych tych urządzeń [2, 3]. Powszechnie stosuje się prasy dwuwalcowe. Znane są także brykieciarki z 1 lub 4 walcami. Powierzchnie robocze walców mogą być gładkie, mieć wypusty zewnętrzne lub wgłębienia. Część roboczą walców wykonuje się w postaci pierścieni lub segmentów. Elementy formujące umieszcza się wewnątrz lub na zewnątrz ramy. W zależności od potrzeb prasy wyposażone są w zasilacze grawitacyjne lub wymuszające przepływ nadawy. Poniżej przedstawiono zakresy niektórych parametrów charakteryzujących oferowane aktualnie w świecie prasy walcowe [4]:

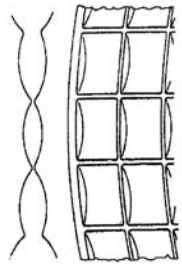
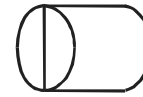
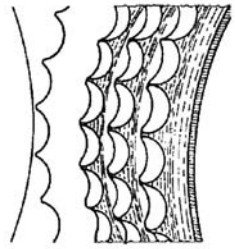
- średnica walców 130 mm – 1600 mm,
- szerokość walców 100 mm – 1500 mm,
- maksymalna wartość siły docisku walca przesuwnego 100 kN – 25 000 kN,
- wartość prędkości obwodowej walców 0,1 m/s – 1,0 m/s,
- moc silnika napędu głównego 4 kW – 650 kW,
- masa prasy walcowej 0,5 Mg – 135 Mg,
- wydajność prasy walcowej 0,5 Mg/h – 120 Mg/h.

Zastosowanie odpowiedniej prasy walcowej wymaga znajomości konfiguracji układu zagęszczania, jego geometrycznych cech konstrukcyjnych, wartości prędkości obwodowej walców, siły docisku walca przesuwnego oraz zapotrzebowania mocy. Należy podkreślić, że dzięki pracom projektowym, które prowadzone są w Katedrze Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie, oferta krajowych producentów brykieciarek staje się coraz bogatsza.

Prasy walcowe posiadają następujące zalety: ciągły charakter pracy, możliwość uzyskania dużej wydajności oraz niewielkie koszty eksploatacji. Istotną zaletą pras walcowych jest możliwość stosowania układów formujących umożliwiających uzyskanie brykietów o zaokrąglonym kształcie i pozbawionych ostrych krawędzi. W porównaniu do pras stemplowych prasy walcowe charakteryzują się wyższą ceną zakupu oraz szybszym zużyciem elementów formujących.

W prasach walcowych stosuje się najczęściej dwa typy pierścieni formujących (tab. 4.1). Pierwszy rodzaj posiada powierzchnię roboczą umożliwiającą wytwarzanie brykietów z płaszczyzną podziału w kształcie kropli, walca, baryłki itp. Drugi typ pierścieni umożliwia wytwarzanie brykietów bez płaszczyzny podziału w kształcie „siodła". Powstają one przy korzystniej rozłożonych naciskach jednostkowych, dzięki czemu posiadają wyższą wytrzymałość mechaniczną i łatwiej opuszczają wgłębienia formujące. Należy jednak zaznaczyć, że powierzchnia robocza takich pierścieni zużywa się intensywniej, dlatego stosuje

Tabela 4.1. Charakterystyka dwóch podstawowych rodzajów pierścieni formujących [1]

Typ pierścieni	Kształt powierzchni formującej	Objętość brykietu	Kształt brykietu
Do wytwarzania brykietów z płaszczyzną podziału		13 cm^3	
Do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału		8,5 cm^3	

się je przede wszystkim do scalania materiałów trudnych do brykietowania w prasie walcowej [4].

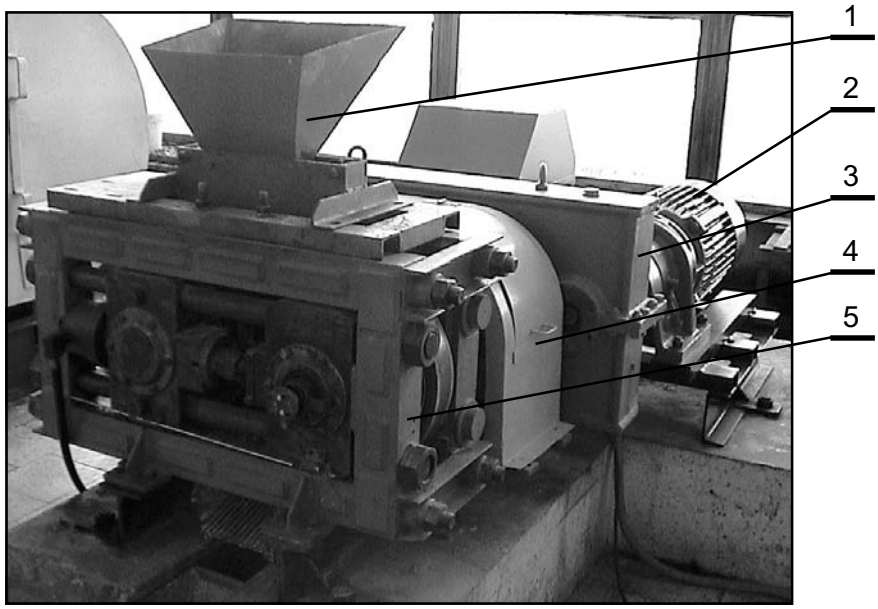
Poniżej przedstawiono opracowane przez AGH w Krakowie najczęściej stosowane w Polsce typy pras walcowych do brykietowania metalowych materiałów drobnoziarnistych.

Laboratoryjna prasa walcowa LPW 450 (rys. 4.5) – składa się z następujących zespołów:

- napędu głównego prasy,
- elektronicznego układu regulacji prędkości obrotowej silnika,
- klatki walców formujących wraz z zasilaczem,
- układu hydraulicznego docisku walca przesuwnego,
- układu pomiarowego.

Układ napędowy zapewnia płynną regulację wartości prędkości obwodowej walców w zakresie 0,1–0,5 m/s. W klatce walców formujących znajdują się dwa walce o średnicy 450 mm: nieprzesuwny oraz przesuwny. Maksymalna wartość siły docisku walca przesuwnego wynosi 220 kN.

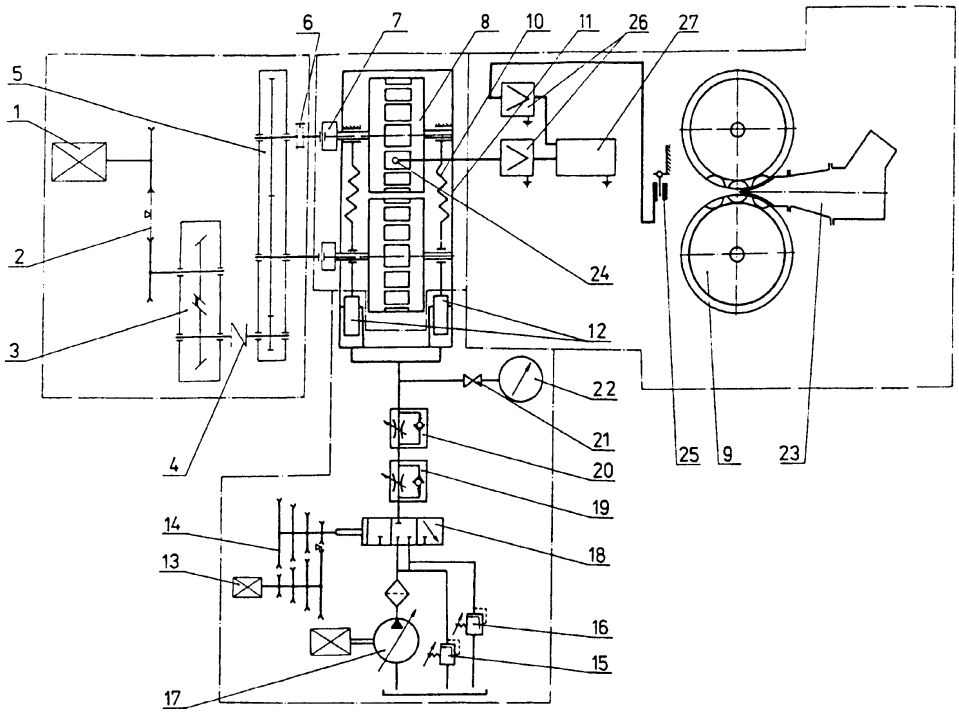
Z rysunku 4.5 wynika, że prasa walcowa LPW 450 posiada konstrukcję o osi walców ułożonych w płaszczyźnie poziomej. Jej zadaniem jest utworzenie z materiału sypkiego wyrobu zespolonego (brykietu) w wyniku działania sił



Rys. 4.5. Widok ogólny laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 [1]:
1 – zasilacz grawitacyjny, 2 – silnik elektryczny, 3 – klatka walców zębatych,
4 – osłona sprzegieł, 5 – klatka walców formujących

nacisku obracających się walców i o postaci utworzonej przez wykrój tych walców (pierścieni). Przygotowany do brykietowania materiał może być podawany w strefę zagęszczania prasy walcowej przy pomocy zasilacza grawitacyjnego, zbieżno-kanałowego lub ślimakowego. Wybór sposobu podawania materiału zależy od jego właściwości. Jak już wspomniano wcześniej, istotne znaczenie dla przebiegu procesu brykietowania i jakości otrzymanych brykietów ma także kształt powierzchni roboczej pierścieni formujących.

Schemat funkcjonalny laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 przedstawiono na rysunku 4.6. W jej skład wchodzą następujące podzespoły: napęd główny, klatka walców formujących, układ hydrauliczny. Napęd główny prasy składa się z asynchronicznego silnika elektrycznego (1) napędzającego, przez przekładnię pasową (2), przekładnię bezstopniową (3), która zapewnia płynną regulację wartości prędkości obwodowej walców formujących (8), (9) w zakresie 0,1 – 0,5 m/s. Przekładnia bezstopniowa sprzęgnięta jest za pośrednictwem sprzęgła podatnego (4) z klatką walców zębatych (5). Spełnia ona rolę reduktora oraz umożliwia synchronizację obrotów walców formujących. W skład klatki walców formujących wchodzi m.in. rama (11), w której ułożyskowane są tocznie dwa walce o średnicy 450 mm, nieprzesuwny (8) oraz przesuwny (9). Walec przesuwny



Rys. 4.6. Schemat funkcjonalny laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 [4]:

1 – silnik asynchroniczny napędu głównego, 2 – przekładnia pasowa, 3 – przekładnia bezstopniowa, 4 – sprzęgło podatne, 5 – klatka walców zębatych, 6 – sprzęgło cierne, 7 – sprzęgło Oldhama, 8 – nieprzesuwny walec formujący, 9 – przesuwny walec formujący, 10 – element sprężysty, 11 – rama, 12 – siłownik nurnikowy, 13 – silnik asynchroniczny, 14 – przekładnia pasowa, 15, 16 – zawory przelewowe, 17 – pompa hydrauliczna, 18 – pulsator hydrauliczny, 19, 20 – zawory dławiące jednostronnego działania, 21 – zawór odcinający, 22 – manometr, 23 – zasobnik grawitacyjny, 24 – tensometryczne przetworniki siły nacisku, 25 – transformatorowy przetwornik przemieszczenia walca przesuwnego, 26 – wzmacniacze pomiarowe, 27 – rejestrator

podparty jest dwoma siłownikami nurnikowymi (12). Służą one do wywierania założonego nacisku podczas brykietowania. Skomplikowany charakter układu hydraulicznego wiąże się z możliwością stosowania pulsującej siły docisku walca przesuwnego.

Prasa walcowa PW 1000 – jest pierwszą w kraju brykieciarką wyposażoną w zasilacz ślimakowy. Konstrukcja tej prasy jest bardzo zbliżona do przedstawionej wcześniej laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 – opracowano ją również w Katedrze Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie. Dane techniczne prasy są następujące [4]:

- średnica podziałowa pierścienia formującego – 1000 mm,
- szerokość pierścienia – 540 mm,
- ilość rzędów wgłębień formujących – 7,
- objętość brykietu – 85 cm^3 (130 cm^3),
- ilość wgłębień w 1 rzędzie – 46 (33),
- moment oporu na walcach – 235 kNm,
- maksymalne obroty walców – 6,5 obr/min,
- maksymalna siła docisku walca – 500 kN,
- szerokość szczeliny między walcami – 2 –3 mm,
- średnica zewnętrzna ślimaka zasilającego – 190 mm,
- średnica wału ślimaka – 55 mm,
- skok linii śrubowej ślimaka – 110 mm,
- ilość ślimaków – 3,
- prędkość obrotowa ślimaka – 70 – 130 obr/min,
- moment oporu na zasilaczu ślimakowym – 0,55 kNm.

Prasa PW 1000 przeznaczona jest dla dużych brykietowni, produkujących nie mniej niż 1 mln ton brykietów rocznie.

Prasa walcowa PW 500 – identyczna jak w poprzednim przypadku (rys. 4.6), przeznaczona jest dla mniejszych zakładów [5]. Posiada ona szereg zalet, z których najważniejsze to: zwarta i prosta konstrukcja, typowy charakter elementów układu napędowego, możliwość wykonawstwa w zakładzie mechanicznym o przeciętnym wyposażeniu, prosta konstrukcja walców, łatwość wymiany zużytych pierścieni formujących, możliwość posadowienia prasy bez skomplikowanego i kosztownego przygotowania terenu. Dzięki temu prasa może być sprawnie przemieszczana i instalowana w dowolnym miejscu. Wybrane dane techniczne prezentowanych brykieciarek przedstawiono w tabeli 4.2.

Prasy walcowa PW 360 – kolejna wersja prasy przeznaczona dla małych zakładów produkcyjnych, różni się od poprzedniej mniejszą wydajnością i objętością brykietu. Szczególnie zalecana do brykietowania szlamów poszlifierskich, takich jak np. odpady z produkcji kulek łożyskowych.

Tabela 4.2. Podstawowe dane techniczne pras walcowych do brykietowania metalowych odpadów drobnoziarnisrtych

Symbol prasy walcowej	Średnica walców [mm]	Moc napędu [kW]	Masa [Mg]	Wydajność objętościowa [m^3/h]	Wymiary gabarytowe [mm]
PW 1000	1000	200	90,5	12,5	8400 × 4200 × 3640
PW 500	500	55	10,4	3,0	4450 × 2650 × 2320
PW 360	360	30	4,2	0,7	3300 × 1650 × 1200

Poniżej podano założenia do konstrukcji prasy walcowej PW 360 przeznaczonej do brykietowania szlamów poszlifierskich [4]:

- sposób zasilania prasy – grawitacyjny,
- średnica podziałowa pierścienia – 360 mm,
- szerokość czynna pierścienia – 90 mm,
- objętość brykietu – 5 cm^3,
- ilość rzędów wgłębień formujących – 3,
- ilość wgłębień w 1 rzędzie – 42,
- moment oporu na walcach – 18,8 kNm,
- maksymalna siła docisku walca – 390,0 kN,
- prędkość obrotowa walców – 16 obr/min,
- szerokość szczeliny między walcami – 12 mm.

W odróżnieniu od poprzednich brykieciarek w prasie PW 360 walce robocze usytuowano na zewnątrz ramy. Ułatwia to w znacznym stopniu wymianę pierścieni formujących.

4.3. Piśmiennictwo

1. Borowski G. 2005: Badania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w aspekcie ich użytkowego wykorzystania. Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska.
2. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1995: Wytyczne do konstrukcji pras walcowych do brykietowania odpadów produkcyjnych. Materiały VIII Konferencji Naukowej nt. „Problemy rozwoju maszyn roboczych", t. III, Zakopane: 35–44.
3. Drzymała Z., Hryniewicz M. 2000: Koncepcja udoskonalonej konstrukcji uniwersalnej prasy walcowej. *Problemy maszyn roboczych*, 15: 39–46.
4. Hryniewicz M. 1997: Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji. *Zeszyty Naukowe AGH – Rozprawy i Monografie*, 58, Kraków.
5. Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A. 2004: Koncepcja medernizacji napędu przemysłowej prasy walcowej PW 500. W: Problemy w budowie maszyn i eksploatacji wybranych maszyn i urządzeń technologicznych. Nr 23, AGH Kraków: 71–77.
6. Kuczmaszewski J., Lutek K., Weroński W. 1995: Konstrukcja urządzenia do brykietowania odpadów poprodukcyjnych metalowych o dużym stopniu rozdrobnienia. Materiały XVII Sympozjum Podstaw Konstrukcji Maszyn. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin–Nałęczów: 515–523.
7. Katalogi ofertowe firmy KK Balers Polska Sp. z o.o.
8. Strona internetowa Zakładu Metalurgii Surówki i Stali Instytutu Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach (www.imz.gliwice.pl).

5. PRZYKŁAD ANALIZY BADAWCZEJ UTYLIZACJI DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW METALOWYCH

W Politechnice Lubelskiej przeprowadzono analizę badawczą użytkowego wykorzystania wybranego typu drobnoziarnistych odpadów metalowych. Celem badań było odpowiednie przygotowanie materiału metalowego oraz sprawdzenie jego przydatności w procesie utylizacji. Do badań wykorzystano odpady poszlifierskie z produkcji kulek łożyskowych wytwarzane przez Fabrykę Łożysk Tocznych w Kraśniku. Odpadom tym nadano formę kawałkową metodą brykietowania, a następnie skierowano je do przetopienia w łukowym piecu elektrycznym. Efektem tego procesu jest odzysk surowca i wykorzystywanie go do produkcji nowych wyrobów metalowych.

5.1. Plan analizy badawczej

Analizę badawczą przeprowadzono według następującego planu:

1. Charakterystyka i ocena właściwości fizyczno-chemicznych poszlifierskich odpadów łożyskowych:
   - pobranie próbek łożyskowych odpadów poszlifierskich,
   - określenie właściwości fizycznych odpadów,
   - badanie składu chemicznego odpadów,
   - określenie warunków jakie muszą spełniać odpady wykorzystywane w hutnictwie,
   - czynniki określające podatność odpadów na zagęszczanie i scalanie,
   - dobór dodatków wiążących.
2. Badania procesu zagęszczania materiału odpadowego w płytowej prasie filtracyjnej:
   - modernizacja konstrukcji testowej prasy filtracyjnej:
     – dobór pompy,
     – dobór tkanin filtracyjnych,
     – dobór płyt filtracyjnych,
   - analiza wpływu parametrów filtracji na proces zagęszczania:
     – ciśnienie filtrowania,
     – czas filtrowania,
     – szybkość podawania filtratu,
     – stopień uwodnienia,
     – wpływ dodatków polepszających filtrację,

- określenie przydatności filtratu do brykietowania:
  - cechy fizyczne filtratu,
  - wpływ sezonowania,
  - skłonność do korodowania.

3. Badania procesu brykietowania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w prasie stemplowej:
   - parametry konstrukcyjne laboratoryjnej prasy stemplowej,
   - projekt oraz wykonanie układu formującego,
   - określenie parametrów brykietowania,
   - analiza właściwości mechanicznych brykietów:
     - wpływ lepiszcza,
     - wpływ sezonowania,
     - wpływ wilgotności mieszanki.
4. Badania procesu brykietowania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w prasie walcowej:
   - dobór specjalistycznej prasy walcowej wraz z układem formującym,
   - ocena podatności na brykietowanie odpadów w prasie walcowej,
   - badania brykietów z punktu widzenia ich przydatności w procesach hutniczych:
     - ocena hutniczej przydatności brykietów świeżych i sezonowanych,
     - sprawdzenie wodoodporności brykietów,
     - badania wpływu wilgotności materiału na wytrzymałość brykietów.
5. Analiza mikroskopowa struktury brykietów:
   - kształt i wielkość ziarna,
   - struktura brykietów z prasy stemplowej,
   - struktura brykietów z prasy walcowej.
6. Analiza procesu przetapiania brykietów w piecu hutniczym:
   - przydatność brykietów do przetopu w piecach stalowniczych,
   - szkodliwość emisji pyłów do atmosfery podczas przetopu brykietów.

Zgodnie z przyjętym założeniem, zbadano i porównano właściwości brykietów otrzymywane dwiema metodami – w prasie stemplowej oraz walcowej. W obu przypadkach określono czynniki wpływające na właściwości odpadów oraz parametry urządzeń i procesów przetwórczych pozwalające uzyskać brykiety o odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej. Oprócz Politechniki Lubelskiej badania wykonywano w laboratoriach Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz na terenie Zakładu Elementów Tocznych „Tsubaki-Hoover" w Kraśniku. Wyniki analiz badawczych umożliwiły opracowanie koncepcji przemysłowej linii technologicznej brykietowania drobnoziarnistych odpadów metalowych.

5.2. Charakterystyka i ocena właściwości łożyskowych odpadów poszlifierskich

Próbki materiału badawczego – łożyskowych odpadów poszlifierskich – pobrano z wydziałów produkujących kulki oraz wałeczki, znajdujących się w krajowych fabrykach łożysk tocznych w Kraśniku, Kielcach, Sosnowcu i Poznaniu. Poniżej przedstawiono najważniejsze informacje o wytypowanych do badań odpadach ze względu na miejsce ich wytwarzania.

1. **Fabryka Łożysk Tocznych w Kraśniku.** Zakład produkujący elementy toczne należy do amerykańsko-japońskiego koncernu Tsubaki-Hoover. Przedsiębiorstwo jest największym krajowym producentem łożysk tocznych. Wytwarza się tutaj ok. 2400 ton odpadów drobnoziarnistych rocznie. Odpady z produkcji kulek łożyskowych występują w postaci szlamu o uwodnieniu ok. 30–40% i zbierane są w trzech miejscach linii technologicznej:
   - pierwsza grupa odpadów powstaje podczas operacji zdzierania kulek (szlifowania wstępnego) w ilości ok. 1000 ton rocznie; zawiera stal łożyskową oraz drobiny wykruszonych tarcz żeliwnych i karborundowych; zawartość chłodziwa w szlamie (Ferrosol) wynosi ok. 10–15%;
   - druga grupa odpadów powstaje w czasie operacji szlifowania kulek przed hartowaniem w ilości ok. 500 ton rocznie; zawiera drobniejsze frakcje stali łożyskowej oraz elektrokorundu; zawartość chłodziwa w szlamie (Biosynt S) wynosi ok. 10–15%;
   - trzecia grupa odpadów powstaje w operacji szlifowania kulek po hartowaniu oraz dogładzaniu w ilości ok. 150 ton rocznie; zawiera stal łożyskową, elektrokorund oraz ziemię okrzemkową; zawartość chłodziwa w szlamie (olej Lapenol) wynosi ok. 3–5%.

   Po usunięciu nadmiaru wody szlamy z grupy pierwszej i drugiej składowane są łącznie w otwartych kontenerach stojących na placu składowym, natomiast szlamy z grupy trzeciej zbierane są w oddzielnych pojemnikach, skąd co pewien czas usuwany jest nadmiar zanieczyszczeń olejowych. Odpady po szlifowaniu pierścieni łożyskowych w ilości ok. 800 ton rocznie składowane są w oddzielnych kontenerach na poletku składowym. Posiadają gąbczastą strukturę i z tego względu podatne są na proces naturalnego dosuszania w sprzyjających warunkach atmosferycznych. Wszystkie odpady poszlifierskie odbierane są w celu gospodarczego wykorzystania na potrzeby przemysłu drogowego i budowlanego.
2. **Fabryka Łożysk Tocznych w Kielcach.** Należy do japońskiego koncernu NSK. Na terenie przedsiębiorstwa produkowane są pierścienie łożyskowe, natomiast elementy toczne do łożysk sprowadzane są z zagranicy. Masa odpadów poszlifierskich z produkcji pierścieni łożyskowych wynosi

ok. 800 ton rocznie. Odpad ten posiada strukturę gąbczastą i gromadzony jest na poletku składowym, gdzie pod wpływem czynników atmosferycznych ulega skorodowaniu i zbryleniu. Odpady odbierane są do gospodarczego wykorzystania na podsypkę przy budowie dróg oraz do rekultywacji wyrobisk pokopalnianych. W poprzednich latach odpad poszlifierski prasowano na prasie hydraulicznej razem z wiórami po obróbce skrawaniem, a następnie przewożono do huty, dodawano do rudy żelaza i przetapiano.

3. **Fabryka Łożysk Tocznych w Sosnowcu.** Należy do niemieckiego koncernu Timken. Odpady poszlifierskie powstające z produkcji wałeczków oraz pierścieni łożyskowych składowane są na wspólnym poletku składowym. Łączna masa odpadów wynosi ok. 700 ton rocznie. Wykorzystywane są w przemyśle drogowym i budowlanym. Przeprowadzono także próby brykietowania odpadów z dodatkiem wiórów metalowych po obróbce skrawaniem, jednak pomysłu tego nie wdrożono do produkcji ze względu na niską wytrzymałość brykietów.
4. **Fabryka Łożysk Tocznych w Poznaniu.** Należy do szwedzkiego koncernu SKF. Wytwarzane są dwa rodzaje odpadów poszlifierskich:
   - po szlifowaniu wałeczków w ilości ok. 350 ton rocznie,
   - po szlifowaniu pierścieni łożyskowych w ilości ok. 150 ton rocznie.

   Odpady składowane są wspólnie w kontenerach oraz na wydzielonym poletku składowym. Wykorzystywane są m.in. do produkcji kostki brukowej.

W tabeli 5.1 przedstawiono podstawowe informacje o dostępnych w kraju łożyskowych odpadach poszlifierskich. W dalszym etapie prac określono ich właściwości fizyczne oraz skład chemiczny.

Właściwości fizyczne odpadów

Odpady powstające w operacji szlifowania elementów tocznych oraz pierścieni łożyskowych występują w postaci szlamu wodnego albo posiadają strukturę gąbczastą w zależności od zastosowanej technologii odfiltrowania nadmiaru wody. W obu przypadkach odpady posiadają początkowe uwodnienie ok. 30–40%.

Odpadowe frakcje ze zdzierania elementów tocznych różnią się od pozostałych tym, że znajdują się w nich większe, widoczne gołym okiem fragmenty materiałów odpadowych, a nawet całe elementy obrabiane wraz z odłamkami rozkruszonych tarcz ściernych. Z kolei frakcje z dogładzania elementów tocznych cechują się zauważalnie większym stopniem zaolejenia.

Uwodnione szlamy poszlifierskie sedymentują w krótkim czasie, a woda zbierająca się na powierzchni zbiornika okresowo usuwana jest za pomocą pompy.

Tabela 5.1. Miejsca powstawania łożyskowych odpadów poszlifierskich

Producent odpadów	Miejsce powstawania odpadów	Miejsca poboru próbek odpadów	Oznaczenie rodzaju odpadu	Masa odpadów, t/rok
FŁT Kraśnik	Zakład elementów tocznych	linia technologiczna produkcji kulek:		
		• zdzieranie	Kr 1	1000
		• szlifowanie	Kr 2	500
		• docieranie	Kr 3	150
	Zakład produkcji pierścieni	kontenery składowe	Kr 4	800
NSK Kielce	Zakład produkcji pierścieni	linia technologiczna szlifowania pierścieni	Ki 1	800
		poletko składowe	Ki 2	
Timken Sosnowiec	Zakład elementów tocznych	linia technologiczna szlifowania wałeczków	So 1	200
	Zakład produkcji pierścieni	poletko składowe	So 2	500
SKF Poznań	Zakład elementów tocznych	kontenery składowe	Po 1	350
	Zakład produkcji pierścieni	kontenery składowe	Po 2	150

Po osiągnięciu uwodnienia poniżej 40% osady przeładowane są ze zbiorników samowyładowczych do kontenerów zbiorczych stojących na placu składowym. W odniesieniu do odpadów o strukturze gąbczastej nie występuje proces sedymentacji, a tym samym woda nie zbiera się na powierzchni zbiornika składowego.

W trakcie składowania w kontenerach lub na poletku składowym odpadów poszlifierskich zachodzi proces samoistnego dosuszania w naturalnych warunkach atmosferycznych. Jednocześnie stopniowo, w miarę ubywania wilgoci, odpady mogą ulegać zbryleniu oraz skorodowaniu. Z tego względu nie należy przechowywać ich zbyt długo, lecz systematycznie przekazywać do zakładów zajmujących się utylizacją odpadów. W tabeli 5.2 przedstawiono wybrane parametry fizyczne badanych odpadów drobnoziarnistych.

Z danych przedstawionych w powyższej tabeli wynika, że niższym uwodnieniem charakteryzowały się odpady pobrane z poletka składowego, co potwierdza dobrą ich podatność na dosuszanie podczas składowania. Z kolej najmniejszy stopień zaolejenia występuje w odpadach ze zdzierania i szlifowania kulek łożyskowych z fabryki łożysk w Kraśniku.

Tabela 5.2. Właściwości fizyczne odpadów

Rodzaj odpadu	Postać odpadu	Gęstość pozorna, g/dm^3	Zawartość wody, %	Zawartość zanieczyszczeń olejowych, %
Kr 1	szlamowy	2,18	32,2	1,43
Kr 2	szlamowy	2,28	31,8	1,95
Kr 3	szlamowy	2,39	4,8	25,24
Kr 4	gąbczasty	0,81	30,9	2,99
Ki 1	gąbczasty	0,80	26,9	3,01
Ki 2	gąbczasty	0,80	22,3	3,73
So 1	gąbczasty	0,85	34,9	3,08
So 2	gąbczasty	0,84	7,4	4,35
Po 1	gąbczasty	0,82	35,1	8,08
Po 2	gąbczasty	0,79	25,4	11,48

Skład chemiczny odpadów

Przygotowanie próbek odpadów poszlifierskich do badania składu chemicznego rozpoczęto od wysuszenia ich w celu całkowitego usunięcia wody. Następnie próbki uśredniano za pomocą mieszaniny kwasów HCl, HNO3 i HF oraz mineralizowano w piecu mikrofalowym CEM MBS 2000. Pierwiastki po mineralizacji oznaczono za pomocą spektrometru ICP. Analizę węgla wykonano z wykorzystaniem automatycznego analizatora węgla typu SHIMADZU TOC 5050 A. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.3.

Stwierdzono większą zwartość żelaza (średnio ok. 90% s.m.) w odpadach z procesu szlifowania elementów tocznych w porównaniu z jego zawartością w odpadach ze szlifowania pierścieni łożyskowych (średnio ok. 81% s.m.). W analizowanych odpadach nie stwierdzono obecności metali ciężkich. Zawartość chromu mieści się w granicach określonych przez obowiązującą normę dla stali na łożyska toczne. Jednakże, do produkcji wysokogatunkowych stali wykorzystuje się złom zawierający mniejsze ilości chromu. Zakłada się odpowiednio mniejszy udział masowy odpadów łożyskowych w przypadku stwierdzenia zbyt dużych zawartości chromu w przetopie. Wielkość zamówień na surowce odpadowe do przetopu w hutnictwie w dużym stopniu będzie zależeć od zapotrzebowania na wyroby stalowe. Zapotrzebowanie na złom znacząco wzrosło na przełomie roku 2003/2004 i przewiduje się jego dalszy wzrost w okresie najbliższych pięciu lat.

Tabela 5.3. Skład chemiczny łożyskowych odpadów poszlifierskich

Rodzaj odpadu	Zawartość pierwiastków, % s.m.									
	Fe	C	Cr	Si	Al	Mn	Cu	Zn	Ni	Pb, Cd
Kr 1	82,9	2,4	1,32	0,44	0,23	0,20	0,12	0,07	0,04	n.s.
Kr 2	92,4	3,3	1,37	0,53	0,39	0,30	0,16	0,09	0,03	n.s.
Kr 3	64,5	3,2	0,45	0,51	0,33	0,23	0,10	0,02	0,02	n.s.
Kr 4	82,7	6,4	1,23	0,34	0,30	0,28	0,13	0,02	0,01	n.s.
Ki 1	88,0	n.o.	0,56	n.o.	n.o.	0,26	0,19	0,03	0,05	n.s.
Ki 2	90,2	n.o.	0,63	n.o.	n.o.	0,25	0,09	0,12	0,07	n.s.
So 1	89,3	n.o.	0,41	n.o.	n.o.	0,32	0,12	0,02	0,07	n.s.
So 2	78,8	n.o.	0,55	n.o.	n.o.	0,26	0,22	0,01	0,07	n.s.
Po 1	87,6	n.o.	0,60	n.o.	n.o.	0,28	0,16	0,10	0,11	n.s.
Po 2	74,3	n.o.	0,89	n.o.	n.o.	0,18	0,17	0,02	0,09	n.s.

n.o. – nie oznaczono, n.s. – nie stwierdzono.

Wymogi hutnictwa w aspekcie możliwości wykorzystania odpadów metalowych

Scalone drobnoziarniste odpady łożyskowe mogą być wykorzystane do przetopu – ze względu na korzystną lokalizację – w Hucie „Ostrowiec" w Ostrowcu Świętokrzyskim posiadającej elektryczne piece łukowe do przetopu złomu. Określono następujące wymogi dopuszczenia brykietów do przetopu w tej hucie w łukowym piecu elektrycznym:

- minimalny wymiar brykietu powinien zawierać się w przedziale od 8 do 200 mm,
- odpowiednie właściwości mechaniczne brykietów,
- zdolność zachowania tych właściwości przez dłuższy czas,
- łatwość magazynowania i transportu,
- odpowiedni skład ziarnowy materiału do brykietu,
- brykiet nie może zawierać siarki, metali ciężkich i ich związków,
- zastosowane lepiszcza nie powinny zawierać substancji szkodliwych dla środowiska wydzielających się podczas spalania,
- zawartość czystego żelaza powyżej 80%.
- zawartość zanieczyszczeń olejowych do 2%,
- zawartość chromu do 0,3%,
- wilgotność brykietu do 1%.

Właściwości mechaniczne brykietów dla potrzeb wyżej zdefiniowanego odbiorcy określane są poprzez odporność na zrzut grawitacyjny oraz siłę ściskania niszczącą brykiet. Odporność brykietu na zrzut grawitacyjny oceniana jest poprzez procentowy ubytek masy po co najmniej trzykrotnym zrzuceniu brykietów z wysokości 2,0 m na stalową płytę. Po każdym zrzucie należy przesiać próbki przez sito o rozmiarze oczek większym niż dopuszczalny minimalny wymiar brykietu. Odporność brykietu na zrzut oblicza się z następującego wzoru [4]:

$$K = \frac{B_z}{B} \cdot 100\%, \tag{5.1}$$

gdzie: B – masa brykietów przed zrzutem, B_z – masa pozostającego na sicie nadziarna.

W oparciu o dane literaturowe oraz wymogi odbiorcy określono minimalną odporność brykietów na zrzut na poziomie 90% (czyli do 10% ubytku masy) [3, 4]. Wymóg ten dotyczy wszystkich brykietów – niezależnie od kształtu i rozmiarów.

Siła ściskania niszcząca brykiet natomiast, posiada znacznie różniące się maksymalne wartości dla różnych rodzajów brykietów. Sposób pomiaru tej siły jest jednakże taki sam – ściska się brykiet umieszczony między płaskimi powierzchniami urządzenia badawczego, aż do momentu zniszczenia struktury brykietu. Badając w ten sposób przydatność do przetopu w Hucie im. T. Sendzimira brykiety o kształcie „siodełkowym", wytworzone na prasie walcowej o średnicy 500 mm stwierdzono [5], że siła niszcząca brykiet powinna wynosić co najmniej 700 N.

Spełnienie wyżej wymienionych wymogów oraz kryteriów mechanicznych stanowią podstawę kwalifikacji brykietów do wykorzystania hutniczego. Uzyskanie brykietów odpowiedniej jakości wiąże się też, m.in. z doborem odpowiedniego lepiszcza. W hutnictwie korzystne jest stosowanie następujących surowców, mogących stanowić komponent lepiszcza:

- wapno prażone,
- dolomit mielony,
- pyły aluminiowe,
- pyły węglowe.

Należy unikać środków wiążących zawierających następujące dodatki:

- siarka,
- fosfor,
- cyna,
- cement,
- gips.

W praktyce dopuszczane są do przetopu brykiety zawierające również składniki niepożądane, pod warunkiem małego ich udziału w stosunku do całkowitej masy wsadu hutniczego.

5.3. Czynniki określające podatność odpadów na scalanie

Podatność materiału drobnoziarnistego na scalanie określana jest jako zdolność do tworzenia, pod wpływem nacisku, trwałej formy kawałkowej o wymaganych parametrach wytrzymałościowych. Zależy ona od [3]:

- właściwości materiału drobnoziarnistego,
- sposobu jego przygotowania do zagęszczania,
- przyjętej metody brykietowania,
- rodzaju urządzenia, w którym realizuje się proces.

W naturalnej postaci nie wszystkie materiały drobnoziarniste wykazują dobrą podatność na scalanie w prasach do brykietowania. Dlatego podejmuje się działania mające na celu zmianę właściwości materiału, które koncentrują się głównie na:

- doborze odpowiedniego składu ziarnowego,
- usunięciu niepożądanych domieszek i zanieczyszczeń,
- określeniu najkorzystniejszego zakresu wilgotności materiału,
- określeniu rodzaju i zawartości lepiszcza,
- dobraniu rodzaju brykieciarki i parametrów brykietowania.

Prace nad rozwiązaniem problemu oceny podatności materiałów drobnoziarnistych na brykietowanie nie podejmowało dotychczas wielu badaczy. Jednymi z pierwszych byli: W.A. Zavalov i N.I. Malinin. Skoncentrowali się oni na procesie zagęszczania ośrodków sypkich w matrycy zamkniętej o przekroju prostokątnym, posiadającej pochylone boczne ściany [3]. Wynikiem ich prac było określenie następującej nierówności:

$$\mu \leq \frac{1}{2}\sqrt{\frac{(1-n)^2}{n}} \tag{5.2}$$

gdzie: μ – współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego, n – współczynnik bocznego nacisku.

Z nierówności (5.2) wynika, że podatność materiału drobnoziarnistego na brykietowanie w matrycy zamkniętej z pochylonymi bocznymi ścianami można ocenić, znając współczynniki kinetycznego tarcia zewnętrznego oraz bocznego nacisku.

Oceną podatności materiału drobnoziarnistego na brykietowanie zajmował się także H. Rieschel. Na podstawie wyników badań procesu brykietowania 20 różnych ośrodków sypkich zaproponował on przedstawioną poniżej ogólną postać równania, które wyraża zależność nacisku jednostkowego od gęstości materiału, uzyskanej w wyniku działania tego nacisku [3]:

$$p_i = B\left(e^{\frac{\rho_i - \rho_o}{\rho_i CM}} - 1 \right) \tag{5.3}$$

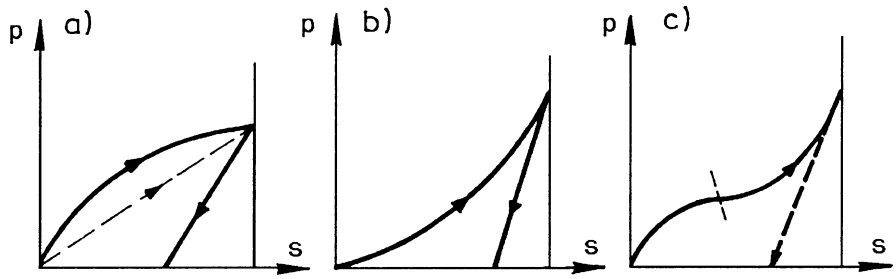
gdzie: p_i – wartość nacisku jednostkowego w określonej fazie procesu brykietowania, ρ_0 – gęstość początkowa materiału, ρ_i – gęstość brykietu uformowanego pod naciskiem p_i, B, C – stałe materiałowe, M – stała niezależna od rodzaju materiału, $M = 0{,}4343$.

Znajomość równania zagęszczania umożliwia m.in. obliczenie tzw. „pracy właściwej" potrzebnej do brykietowania w matrycy zamkniętej jednej tony materiału. Zdaniem H. Rieschela wyższy nakład pracy świadczy o intensywniejszym zagęszczeniu ośrodka sypkiego, a tym samym lepszej jakości brykietów. Taka metoda oceny podatności materiału na brykietowanie dotyczy przede wszystkim pras stemplowych. Prowadząc kolejne eksperymenty H. Rieschel próbował sprawdzić jej przydatność w przypadku brykieciarki walcowej. Przeprowadzone przez niego badania polegały na zagęszczaniu kilku odmian wapna palonego w prasie stemplowej, a następnie walcowej. Wskazują one na występowanie rozbieżności w przypadku oceny podatności na brykietowanie niektórych odmian wapna palonego w prasie stemplowej oraz walcowej [3].

Prezentując osiągnięcia firmy BEPEX w zakresie opracowania i wdrożenia technologii brykietowania różnych materiałów drobnoziarnistych, H. Hummel podkreślił znaczenie charakterystyki zagęszczania przy dokonywaniu oceny podatności na brykietowanie w prasie walcowej ośrodka sypkiego. Charakterystyka zagęszczania wyraża zależność między naciskiem jednostkowym i stopniem zagęszczenia lub gęstością materiału drobnoziarnistego. Wyznacza się ją eksperymentalnie, brykietując materiał w cylindrycznej matrycy zamkniętej. H. Hummel wyróżnił trzy podstawowe rodzaje charakterystyki zagęszczania: degresywną, progresywną i degresywno-progresywną. Przedstawiono je na rysunku 5.1.

Z badań eksperymentalnych, prowadzonych w firmie BEPEX wynika, że w prasach walcowych brykietują się z powodzeniem tylko te materiały drobnoziarniste, które wyróżniają się progresywną charakterystyką zagęszczania [3].

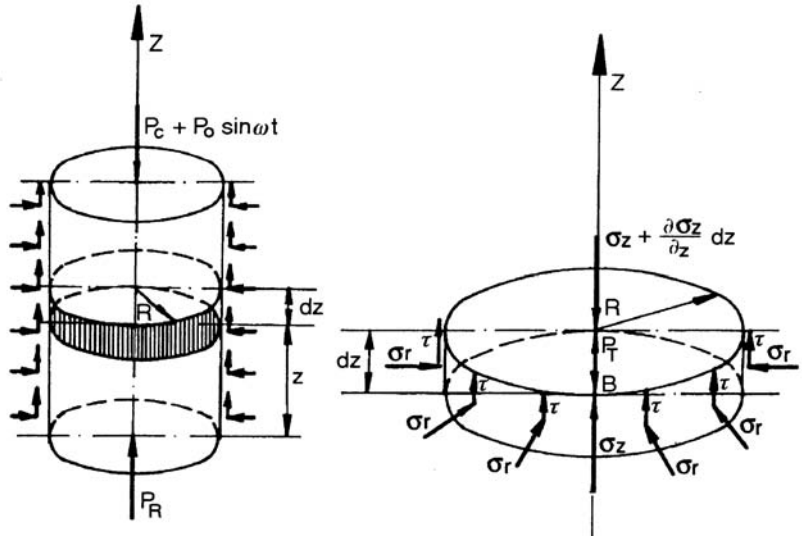
Zbieżne z H. Humelem wyniki badań uzyskał M. Hryniewicz [3]. Zagęszczano wybrane materiały drobnoziarniste, takie jak: gips z procesu mokrego odsiarczania spalin, mułki zgorzelinowe z dodatkiem wapna hydratyzowanego i melasy oraz wapno palone. Stwierdzono, że posiadają one progresywne



Rys. 5.1. Przykłady podstawowych rodzajów charakterystyki zagęszczania materiału drobnoziarnistego [3]: a – degresywna, b – progresywna, c – degresywno-progresywna

charakterystyki zagęszczania i z powodzeniem brykietuje się je zarówno w skali laboratoryjnej, jak i przemysłowej.

Oceniając podatność materiału drobnoziarnistego na brykietowanie w prasie walcowej, należy zwrócić uwagę na charakter zmienności współczynnika kinetycznego tarcia zewnętrznego w procesie zagęszczania. W przypadku, kiedy wartość tego współczynnika rośnie, może następować niszczenie powierzchni brykietów lub pozostawanie materiału we wgłębieniach formujących. Szczególnie trudne do zagęszczania materiały drobnoziarniste brykietuje się w matrycy zamkniętej. Model tego procesu w odniesieniu do wiórów z metali nieżelaznych opracował Z. Drzymała [3]. Przyjęty schemat obciążeń wywieranych na brykiet oraz wydzielony element jego objętości przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Schemat obciążeń wywieranych na brykiet oraz wydzielony element jego objętości [3]

Ostateczną postać modelu matematycznego wibracyjnego zagęszczania dla n-tego cyklu drgań zaprezentowano poniżej:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z_2} - 2a_n \frac{\partial u}{\partial z} - p_n = b_n^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{5.4}$$

$$a_n = \frac{\mu v'}{R(1-v')} \tag{5.5}$$

$$b_n^2 = \frac{\rho_n}{k} \tag{5.6}$$

$$p_n = \frac{P_T}{\pi R^2 k} \tag{5.7}$$

$$k = \frac{1-v'}{1-v'-2v'^2} E' \tag{5.8}$$

gdzie: u – przemieszczenie elementu objętości brykietu w kierunku osi z w pojedynczym cyklu drgań, t – czas zagęszczania, μ – współczynnik tarcia zewnętrznego, R – promień matrycy, v' – pozorna liczba Poissona dla n-tego cyklu drgań, ρ_n – średnia gęstość brykietu w n-tym cyklu drgań, pT – siła tarcia w zagęszczanym materiale, E' – pozorny moduł Younga dla n-tego cyklu drgań.

Model matematyczny procesu wibracyjnego zagęszczania wiórów z metali nieżelaznych poddano badaniom weryfikacyjnym w skali laboratoryjnej oraz przemysłowej [3]. Wykazały one jego zadowalającą zgodność z rzeczywistą sytuacją fizyczną. Można go zatem stosować w celu doboru optymalnych parametrów procesu zagęszczania, określenia stanu naprężenia w dowolnym przekroju poprzecznym brykietu, a także jego gęstości w różnych fazach brykietowania. Model stosowano m.in. w analizie i syntezie komputerowej prototypowej prasy wibracyjnej do brykietowania wiórów z metali nieżelaznych.

W procesie brykietowania materiału drobnoziarnistego w matrycy zamkniętej pod naciskiem statycznym R. Thompson uwzględnił wyniki badań wskazujące na paraboliczny charakter rozkładu nacisku jednostkowego oraz naprężeń normalnych w brykiecie. Zaproponował on podaną poniżej postać modelu matematycznego [3]:

$$\sigma(r,z) = r^2 f(z) + C(z) \tag{5.9}$$

$$\frac{\partial \sigma(r,z)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial \left(r\tau(r,z)\right)}{\partial r} \tag{5.10}$$

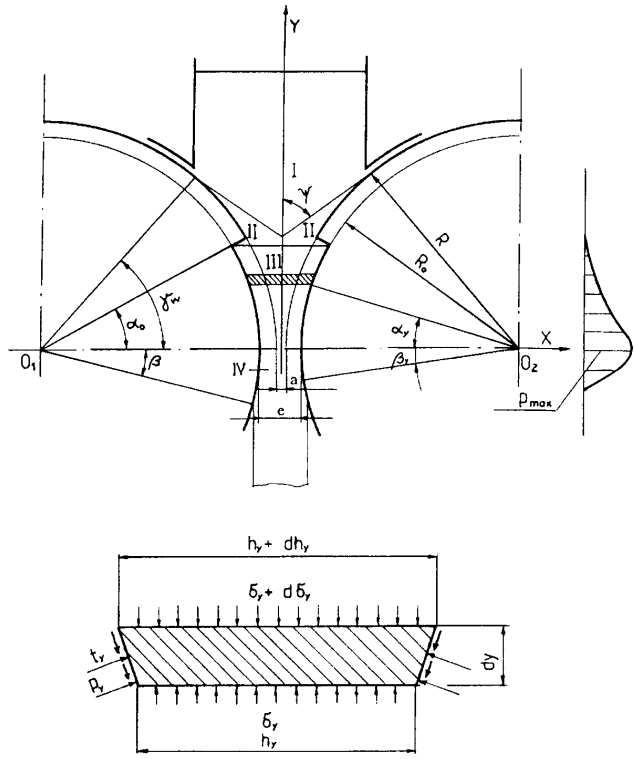
gdzie: $\sigma(r,z)$ – naprężenie normalne w dowolnej strefie brykietu, r – współrzędna, określająca odległość strefy od osi brykietu, $f(z)$ – funkcja, uwzględniająca zmianę naprężenia normalnego wzdłuż wysokości brykietu, $C(z)$ – naprężenie normalne w osi brykietu, $\tau(r,z)$ – naprężenia ścinające w dowolnej strefie brykietu.

Układ równań (5.9) i (5.10) rozwiązano w sposób analityczny, uzyskując zależności umożliwiające obliczanie naprężeń normalnych oraz stycznych w dowolnej strefie zagęszczanego ośrodka sypkiego:

$$\rho(r,z) = \rho_n + T\sigma^{1/3}(r,z) \tag{5.11}$$

Przedstawiona formuła (5.11) umożliwia określenie teoretycznego rozkładu gęstości materiału w brykiecie.

M. Hryniewicz opracował własny model matematyczny procesu brykietowania materiału drobnoziarnistego w prasie walcowej z zasypem grawitacyjnym [3]. Brykietowanie zastąpiono walcowaniem ośrodka sypkiego, wprowadzając tzw. „zastępczy układ walców" (rys. 5.3). Porównując sumaryczną objętość wgłębień formujących na powierzchniach roboczych walców brykieciarki



Rys. 5.3. Schemat idealizacji układu zagęszczania prasy walcowej [3]

z objętością płaskiego pasma walcowanego w układzie zastępczym, otrzymano zależność, wyrażającą związek między promieniami walców w układzie rzeczywistym oraz zastępczym:

$$R_0 = \sqrt{R^2 - \frac{kV_b}{2\pi B}} \tag{5.12}$$

gdzie: R_0 – promień walców w układzie zastępczym, R – rzeczywisty promień walców, k – ilość wgłębień formujących walca, V_b – objętość brykietu, B – szerokość czynna walców w układzie rzeczywistym oraz zastępczym.

Otrzymano następującą postać modelu matematycznego:

$$\frac{dp_y}{dh_y} + p_y \frac{\mu ctg(a_0/2)}{h_y} = \frac{\upsilon}{h_y} + \frac{d\upsilon}{dh_y} \tag{5.13}$$

gdzie: α_0 – kąt chwytu, υ – jednostkowy opór zagęszczania, μ – współczynnik tarcia zewnętrznego, h_y – odległość między walcami, p_y – nacisk jednostkowy.

Jednostkową siłę tarcia t_y, występującą na powierzchni walców, wyrażono poprzez nacisk jednostkowy p_y oraz współczynnik tarcia zewnętrznego μ, stanowiący zmienną zależną od stopnia zagęszczenia s oraz wilgotności w brykietowanego materiału:

$$t_y = \mu_{(s,w)} p_y \tag{5.14}$$

Analizując wyniki badań, stwierdzono, że wartości jednostkowego oporu zagęszczania w poszczególnych fazach procesu brykietowania są znacznie zróżnicowane. Dlatego niemożliwe jest przedstawienie, z dostateczną dokładnością, zależności tego oporu od stopnia zagęszczenia oraz wilgotności materiału za pomocą jednej formuły empirycznej. Wykazano, że w drugiej fazie procesu brykietowania formuła (5.13) posiada postać:

$$\upsilon = Cs^D w^E \tag{5.15}$$

gdzie: C, D, E – współczynniki równania regresji.

W konkretnym przypadku, kiedy znana jest wilgotność przygotowanego materiału, w pierwszej fazie brykietowania można założyć liniowy charakter zmienności jednostkowego oporu zagęszczania. Będzie on wtedy funkcją stopnia zagęszczenia, co wyrażono za pomocą równania:

$$\upsilon = Ms + J \tag{5.16}$$

Znajomość przebiegu nacisku jednostkowego zarówno w strefie zagęszczania, jak i rozprężania brykietów pozwala na określenie obciążeń prasy. Przedstawiony model matematyczny stanowił podstawę opracowania programu symulacji komputerowej procesu brykietowania materiału drobnoziarnistego w prasie walcowej [3].

Prasy walcowe coraz częściej stosuje się do brykietowania w nowoczesnych liniach technologicznych. Decydują o tym ich zalety, z których najważniejsze to: ciągły charakter pracy, możliwość uzyskania dużej wydajności, mniejsze zużycie energii oraz dłuższa żywotność elementów formujących. Zagadnienia określenia konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej oraz doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych w celu brykietowania drobnoziarnistych odpadów przemysłowych przedstawiono w literaturze [1, 2, 3].

Do realizacji planowanych badań zdecydowano się na zastosowanie dwóch rodzajów pras do brykietowania odpadów, a mianowicie:

- stemplowej prasy hydraulicznej PH 20 będącej na wyposażeniu laboratorium Katedry Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej,
- prasy walcowej LPW 450 stanowiącej wyposażenie laboratorium Katedry Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

5.4. Dobór dodatków wiążących

Znaczną rolę w polepszeniu właściwości mechanicznych brykietów odgrywają środki wiążące. Dotychczasowe wyniki badań wykazały skuteczność dodatków [5, 6, 7]:

- nieorganicznych – bentonit, glina, gips, cement, wapno hydratyzowane, szkło wodne i żel krzemionkowy;
- organicznych – asfalty, paki, smoły, węgle spiekające, pochodne celulozy, dekstryny, skrobie, woski, parafiny, ługi posulfitowe i żywice.

Jeden z pierwszych sposobów brykietowania materiałów drobnoziarnistych uwzględniał wykorzystanie lepiszcza bitumicznego. Brykietowanie prowadzi się w temperaturze około 450 °C dodając jako lepiszcza asfalty i paki. Zastosowanie tych lepiszczy stwarza problem wydzielania się szkodliwych dla środowiska dymów podczas spalania. Znane inne sposoby wytwarzania brykietów przewidują zastosowanie lepiszcza organicznego w postaci mieszaniny dwóch składników, np. melasy ze skrobią w odpowiednich proporcjach.

Do badań wytypowano osiem rodzajów środków wiążących:

- melasa,
- skrobia,

- szkło wodne,
- wapno palone,
- miał węglowy,
- kwas octowy,
- PAW (alkohol poliwinylowy),
- rokrysol (wodny roztwór jednosodowej soli poliakrylamidu).

Spośród powyższych substancji trzy występują jako materiały odpadowe, tj: melasa, skrobia i miał węglowy. Substancje chemiczne PAW oraz rokrysol, nie występowały dotychczas w charakterze środka wiążącego i stwierdzenie ich ewentualnej przydatności stanowiłoby nowy kierunek badań procesu brykietowania.

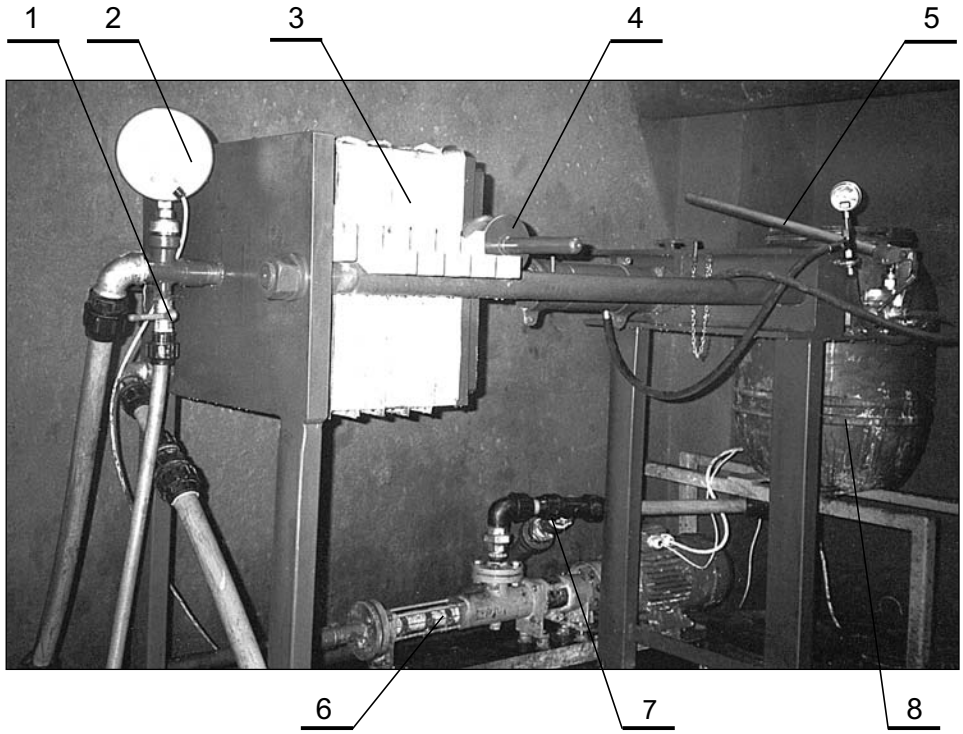
5.5. Badania procesu zagęszczania poszlifierskiego szlamu odpadowego w płytowej prasie filtracyjnej

Odpadowy szlam poszlifierski z produkcji elementów tocznych cechuje się uwodnieniem w zakresie 30–40%. W celu usunięcia nadmiaru wody zaproponowano zastosowanie płytowej prasy filtracyjnej. Prasy te są powszechnie stosowane do mechanicznego odwadniania osadów w oczyszczalniach ścieków, galwanizeriach, garbarniach oraz zakładach przemysłu spożywczego. Na rysunku 5.4 pokazano testową prasę filtracyjną przystosowaną do odwadniania metalowych odpadów drobnoziarnistych. Prasa ta składa się z następujących podzespołów:

- zespół filtracyjny z płytami i tkaninami filtracyjnymi,
- głowice dociskowe z siłownikiem,
- zespół podający filtrat z pompą tłoczącą,
- zespół odprowadzający wodę,
- zespół sterujący pracą urządzenia.

Płyty filtracyjne połączone ze sobą tworzą komory w których zbiera się osad. Zastosowano pięć płyt filtracyjnych umożliwiających uzyskanie trzech „placków" jednocześnie. Pomiędzy płytami nałożone są polipropylenowe tkaniny filtracyjne. Dobór tkaniny uzależniony jest od rodzaju i właściwości filtrowanego osadu. Spośród kilkunastu typów tkanin o różnej przepuszczalności wody do badań wytypowano dwa rodzaje: PpT 2557 (o mniejszej przepuszczalności) oraz PpT 2576 (o większej przepuszczalności), produkowane przez LENTEX Pabianice.

Utrzymanie odpowiedniego ciśnienia w komorze filtracyjnej zależy od prędkości obrotowej pompy, która regulowana jest za pomocą jednego z najważniejszych elementów zespołu sterującego – falownika. W prasie filtracyjnej



Rys. 5.4. Fotografia stanowiska badawczego z testową prasą filtracyjną: 1 – zawór spustowy, 2 – manometr, 3 – płyty filtracyjne, 4 – płyta dociskowa, 5 – dźwignia siłownika, 6 – pompa, 7 – zawór doprowadzający filtrat, 8 – zbiornik filtratu

zastosowano pompę ze ślimakowym zespołem podającym. Wyróżnia się dwie fazy pracy pompy:

- faza ciągłej pracy – podczas napełniania komór filtracyjnych osadem,
- faza pulsacyjnej (przerywanej) pracy – podczas odfiltrowania wody i okresowego dopełniania komór osadem.

W procesie filtracji podczas odfiltrowania wody stosuje się ciśnienia od 0,3 MPa do 1,5 MPa, przeciętnie 0,5 – 0,6 MPa. W czasie okresowego dopełniania komór osadem cykle pulsacyjne nie są jednakowe – są one coraz krótsze w trakcie trwania tego procesu.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie podatności na zagęszczanie odpadów łożyskowych w płytowej prasie filtracyjnej. Na proces filtracji wpływają następujące czynniki:

- ciśnienie filtrowania,
- czas filtrowania,
- rodzaj tkaniny filtrującej,

- początkowy stopień uwodnienia,
- wpływ środków wspomagających.

Stosując zagęszczanie odpadów w płytowej prasie filtracyjnej możliwe jest uzyskanie filtratów o końcowym uwodnieniu ok. 25%. Stwierdzono, że stosując ciśnienie 0,6 MPa, czas filtracji równy 20 min. oraz tkaniny o dużej przepuszczalności uzyskuje się filtraty o dużej zwartości i niewielkim uwodnieniu. Ze względu na zapewnienie mniejszego zużycia energii oraz dłuższej bezawaryjnej pracy pompy zaleca się rozcieńczenie osadu wodą do wartości ok. 95%. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Wyniki badań procesu zagęszczania w płytowej prasie filtracyjnej

Nr próby	Typ tkaniny	Czas, min	Ciśnienie, MPa	Wilgotność początkowa, %	Wilgotność końcowa, %
1	PpT 2557	15	0,5	95	28,2
2	PpT 2557	20	0,5	95	27,2
3	PpT 2557	25	0,5	95	26,9
4	PpT 2576	15	0,6	95	25,8
5	PpT 2576	20	0,6	95	25,0
6	PpT 2576	25	0,6	95	24,2

W celu polepszenia efektywności filtracji, w większości przypadków osad przed odwadnianiem kondycjonuje się polimerami, koagulantami klasycznymi lub wprowadza środki wspomagające. Udział dodatków wspomagających wynosi 1–2%. Na efektywność odwadniania osadów w prasach wpływa także grubość „placka" osadu (szerokość komory filtracji), ponieważ osad frakcjonuje się samorzutnie w czasie odwadniania.

Wpływ dodatków wspomagających na proces filtracji osadów poszlifierskich sprawdzono doświadczalnie. W tym celu wybrano dwa preparaty: PAW (alkohol poliwinylowy) oraz rokrysol (wodny roztwór jednosodowej soli poliakrylamidu). Wyniki przedstawione w tabeli 5.5 pokazują brak pozytywnego wpływu wytypowanych dodatków wspomagających. Nie zaobserwowano zmniejszenia zarówno stopnia uwodnienia jak i zaolejenia analizowanych odpadów w postaci „placków" filtracyjnych.

Uzyskane z prasy filtracyjnej zagęszczone osady zawierają jednak zbyt dużo wody, aby nadawały się bezpośrednio do scalania metodą brykietowania. Należy zatem stosować dosuszanie tych osadów. W tym celu można wykorzystać warunki naturalne i dosuszać osady na poletku składowym lub zastosować dosuszanie termiczne w odpowiednich suszarkach. W tabeli 5.6 porównano właściwości fizyczne odpadów bezpośrednio po opuszczeniu komory filtracyjnej oraz po ich wysuszeniu.

Tabela 5.5. Wpływ dodatków wspomagających na efektywność filtracji

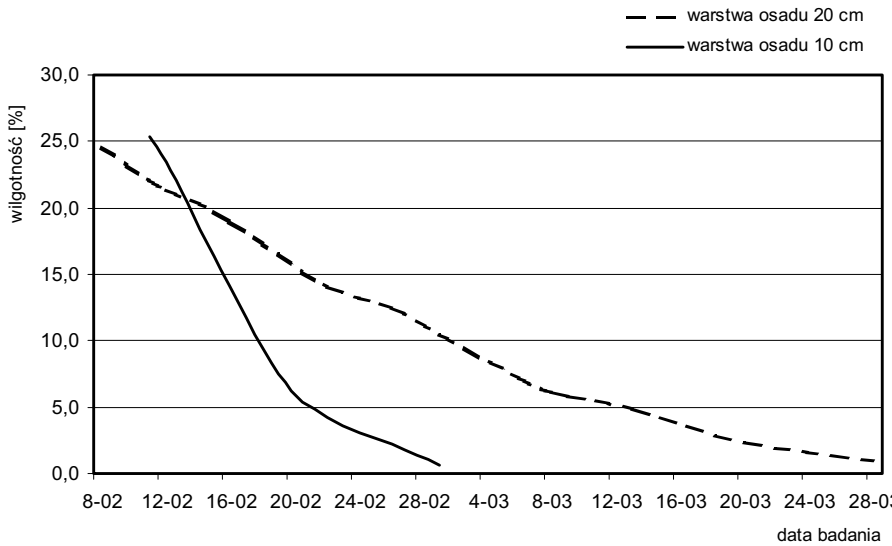
Rodzaj dodatku wspomagającego	Grubość „placka" osadu, m	Typ tkaniny	Czas, min.	Ciśnienie, MPa	Wilgotność, %	Zawartość zanieczyszczeń olejowych, %
PAW	0,06	PpT 2576	20	0,6	26,2	2,80
Rokrysol	0,06	PpT 2576	20	0,6	27,9	2,35
Bez dodatku	0,06	PpT 2576	20	0,6	25,0	2,03

Tabela 5.6. Właściwości fizyczne osadu pofiltracyjnego

Stan odpadu	Postać odpadu	Cechy charakterystyczne	Gęstość pozorna, g/dm^3	Wilgotność, %
Uwodniony	jednorodny	łamliwy, miękki	2,252	25,0
Wysuszony	zbrylony	kruchy, twardy	1,897	0,1

Sprawdzono doświadczalnie podatność łożyskowych osadów pofiltracyjnych na dosuszanie naturalne oraz termiczne. Celem dosuszania w warunkach naturalnych uformowano dwie pryzmy osadów, o grubościach 10 cm oraz 20 cm. Raz dziennie dokonywano pomiarów wilgotności sezonowanych osadów. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 5.5.

Osady składowane w pryzmy o grubości 10 cm uległy całkowitemu wysuszeniu w okresie ok. 30 dni, natomiast dla pryzmy o grubości 20 cm czas suszenia wynosił ok. 60 dni. Należy zwrócić uwagę, że istotnym czynnikiem

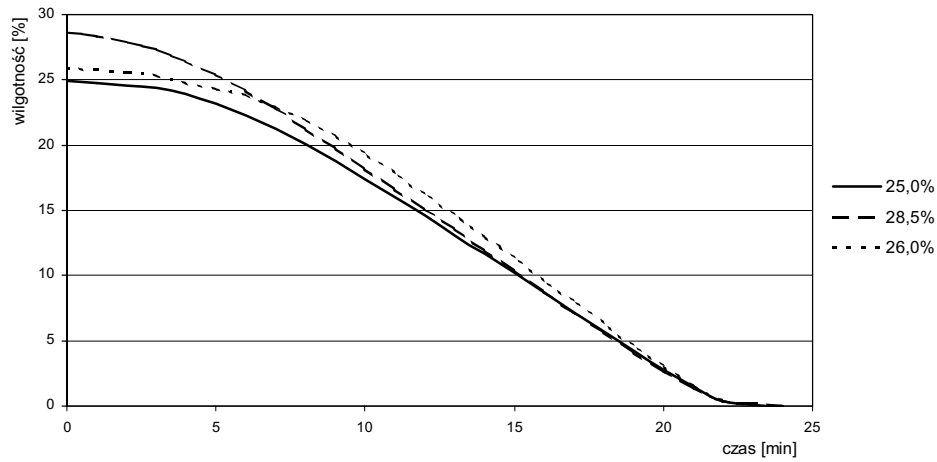


Rys. 5.5. Zmiana wilgotności naturalnie sezonowanego osadu pofiltracyjnego dla różnych grubości warstwy

przyspieszającym lub opóźniającym proces naturalnego dosuszania osadów pofiltracyjnych są warunki pogodowe. Z tego względu zaleca się stosowanie zadaszenia składowiska odpadów.

Termiczne dosuszanie osadów pofiltracyjnych stosuje się w przypadku konieczności szybkiego przetworzenia materiału odpadowego lub braku miejsca na ich dłuższe składowanie. Przeprowadzono badania spadku wilgotności osadu w trakcie dosuszania termicznego. Do badań wykorzystano wagosuszarkę firmy KETT typu FD-620 umożliwiającą ciągły pomiar wilgotności z dokładnością ±0,1%. Elementem grzejnym jest lampa o mocy 185 W, suszenie prowadzi się w zakresie temperatur 50–195 °C.

Temperatura suszenia wynosiła 99–100 °C. Stwierdzono, że w temperaturach powyżej 105 °C odpady wykazują dużą podatność na zapłon inicjowany przez łatwopalne ulatniające się węglowodory. Wyniki pomiarów zmian wilgotności osadu suszonego termicznie przedstawiono na rysunku 5.6.



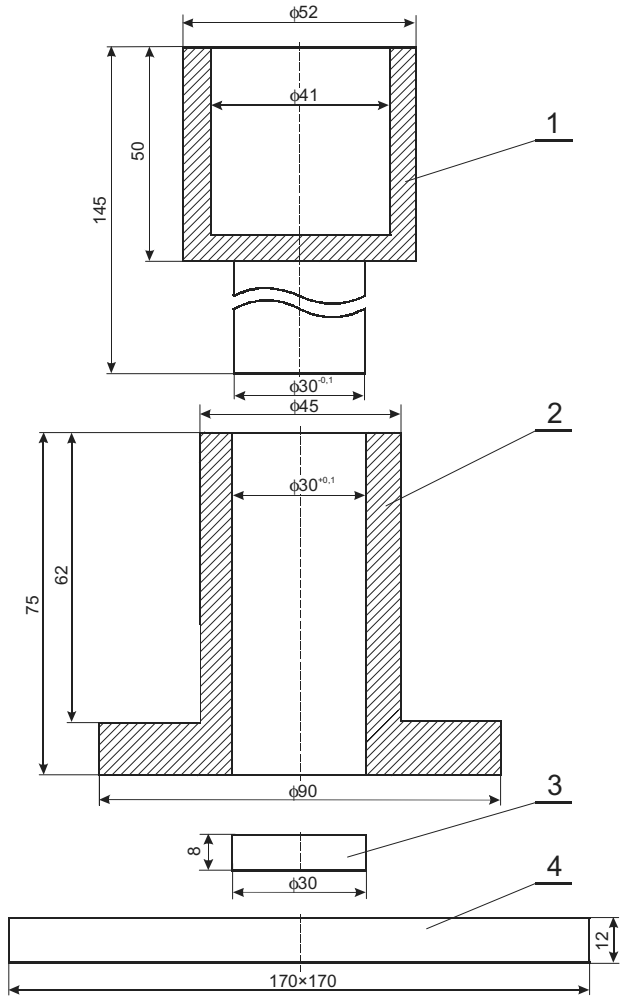
Rys. 5.6. Zmiana wilgotności osadu pofiltracyjnego w zależności od czasu suszenia

Dla analizowanych odpadów czas całkowitego suszenia zawierał się w granicach 23–24 min. Wynika z tego, ze termiczne dosuszanie osadów pofiltracyjnych może być szybkim i skutecznym sposobem usunięcia nadmiaru wilgoci. Jedynym ograniczeniem są znaczne koszty eksploatacyjne spowodowane dużym zużyciem energii w przypadku stosowania suszenia w skali przemysłowej.

Niezależnie od sposobu suszenia odpady mają skłonność do samoczynnego scalania. Przed ich brykietowaniem należy więc je rozdrobnić ręcznie lub mechanicznie stosując kruszarki wibracyjne, młotkowe i inne.

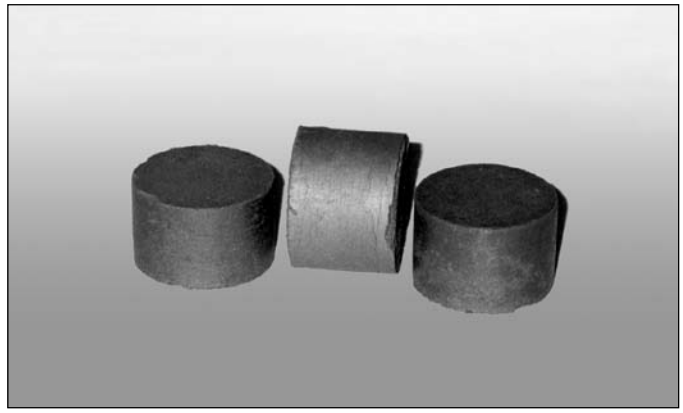
5.6. Badania procesu brykietowania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w prasie stemplowej

Do brykietowania wysuszonych i rozdrobnionych łożyskowych odpadów poszlifierskich wykorzystano laboratoryjną prasę hydrauliczną PH 20 (patrz rozdz. 4.1). Dla tej prasy opracowano i wykonano specjalny zespól formujący składający się z matrycy i stempla. W matrycy znajdują się otwory umożliwiające odprowadzenie nadmiaru pozostałej w materiale odpadowym wody. Wymiary matrycy i stempla przedstawiono na rysunku 5.7.



Rys. 5.7. Parametry konstrukcyjne zespołu formującego: 1 – stempel, 2 – matryca, 3 – przeciwstempel, 4 – podstawa

Matryca (2) umożliwia uzyskanie brykietów o walcowym kształcie pokazanych na rysunku 5.8. Stosowanie przeciwstempla (3) ma na celu uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu naprężeń. Sprasowany wyrób opuszcza matrycę w jej dolnej części po usunięciu przeciwstempla i podstawy (4) oraz wypchnięciu za pomocą stempla (1). Istnieje możliwość szybkiej wymiany matryc i stempli w celu uzyskania brykietów o innych wymiarach i kształtach.



Rys. 5.8. Brykiety z prasy stemplowej

Do scalania analizowanych odpadów określono następujące parametry:

- wymiary i masa brykietu,
- wilgotność materiału,
- rodzaj i ilość dodatków wiążących.

Masę i wymiary brykietu w relacji do siły nacisku stempla określono eksperymentalnie. Scalając porcje odpadu o masie 50 g, wywierano taki nacisk, aby wysokość uzyskanego brykietu odpowiadała w przybliżeniu 2/3 średnicy. Brykiety o średnicy 30 mm i wysokości 20 mm uzyskano przy nacisku jednostkowym stempla 20 MPa.

Określono wpływ wilgotności badanego materiału odpadowego na stopień zagęszczenia w prasie stemplowej. W tym celu brykietowano jednakowe porcje materiału o różnej wilgotności z zastosowaniem nacisków jednostkowych stempla 10, 20 i 30 MPa. Po osiągnięciu tych wartości utrzymywano nacisk przez 10 sekund. Stopień zagęszczania obliczano stosując zależność:

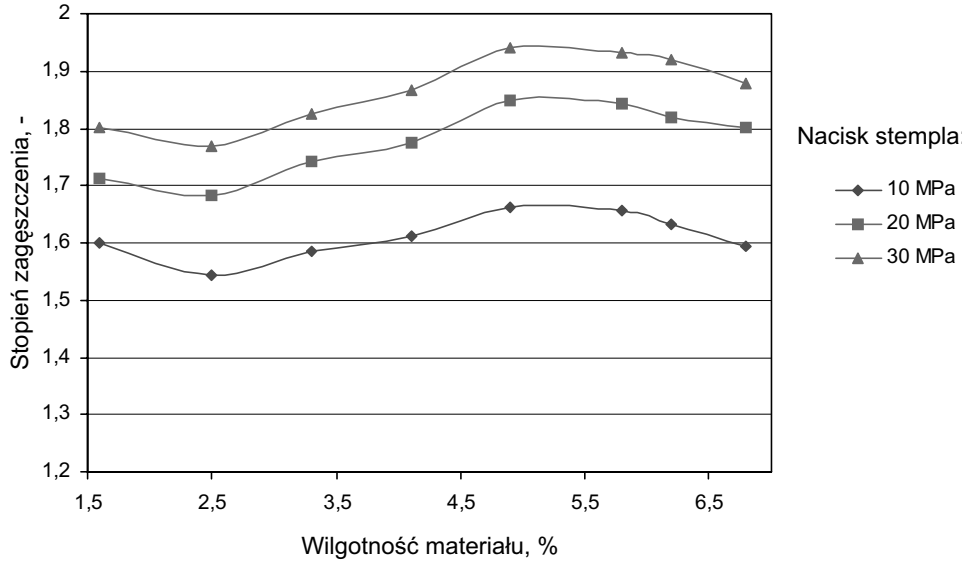
$$s = \frac{Hp}{Hp - l} \tag{5.17}$$

gdzie: Hp – wysokość początkowa zagęszczanego materiału, l – przemieszczenie stempla.

Prezentowane w tabeli 5.7 i na rysunku 5.9 wyniki badań własnych pokazują, że korzystny zakres wilgotności mieszanki do brykietowania powinien zawierać się w granicach 4,5 do 6,5%. Wobec tego, w dalszym etapie badań scalano mieszanki dosuszane do wilgotności ok. 5%, a następnie sezonowano uzyskane brykiety. Po pięciodniowym okresie sezonowania uzyskano brykiety o wilgotności ok. 2,5%. Przeprowadzone konsultacje z pracownikami Huty „Ostrowiec", potwierdziły możliwość dopuszczenia tych brykietów do przetopu. Ostateczna weryfikacja ich przydatności wymagała przeprowadzenia prób hutniczych.

Tabela 5.7. Wyniki badań stopnia zagęszczenia materiału odpadowego w zależności od wilgotności i nacisku jednostkowego stempla

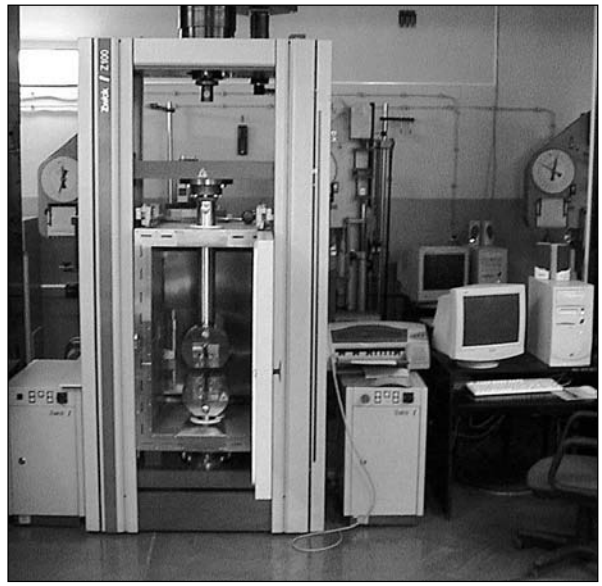
Nacisk jednostkowy, MPa	Wilgotność materiału, %							
	1,6	2,5	3,3	4,1	4,9	5,8	6,2	6,8
	Stopień zagęszczenia, –							
10	1,600	1,533	1,585	1,613	1,662	1,657	1,632	1,595
20	1,714	1,683	1,743	1,775	1,850	1,842	1,820	1,800
30	1,800	1,769	1,824	1,868	1,940	1,931	1,920	1,880



Rys. 5.9. Zależność między stopniem zagęszczenia a wilgotnością materiału odpadowego

Powszechne panuje przekonanie, że na jakość brykietów w sposób istotny wpływa rodzaj i ilość stosowanych dodatków wiążących. W przypadku brykietowania łożyskowych odpadów poszlifierskich wpływ środków wiążących zweryfikowano doświadczalnie. W pierwszym rzędzie wykonano próby brykietowania bez stosowania środków wiążących. Niestety, nie uzyskano wyrobów o zadawalającej odporności. Zastosowanie środka wiążącego do scalania łożyskowych odpadów poszlifierskich znacznie poprawiło odporność mechaniczną brykietów. W charakterze lepiszcza często stosowane są mieszaniny różnego rodzaju substancji w odpowiednich proporcjach. Jednakże przygotowanie mieszaniny może być czasochłonne i powiększa koszty wytworzenia brykietu, dlatego w badaniach sprawdzano skuteczność poszczególnych rodzajów środków wiążących jako pojedynczego składnika. Według danych literaturowych zawartość środka wiążącego nie powinna przekraczać kilkunastu procent. Dobór odpowiedniego lepiszcza oraz jego udziału masowego umożliwiły przeprowadzone próby wytrzymałościowe brykietów z prasy stemplowej. Ocenę wytrzymałościową brykietów dokonano w oparciu o dwa warunki, a mianowicie ponad 90-cio procentową odporność na zrzut grawitacyjny oraz wartość siły niszczącej brykiet ustaloną przez odbiorcę na poziomie nie mniejszym niż 700 N.

Badania przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową ZWICK Z100 (rys. 5.10) będącą na wyposażeniu laboratorium Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Lubelskiej. Urządzenie umożliwia ciągły pomiar

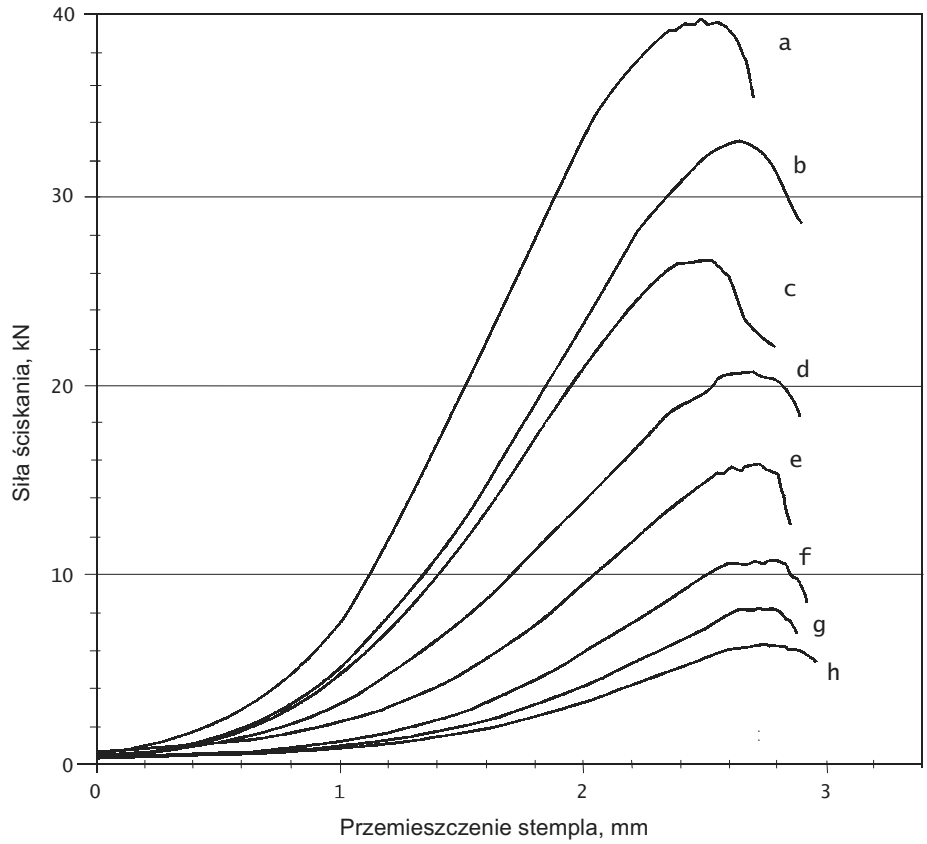


Rys. 5.10. Fotografia stanowiska badawczego z maszyną wytrzymałościową ZWICK Z100

nacisków i przemieszczeń stempla, rejestrując dane w pamięci komputera. Dane na wydruku prezentowane są w formie tabeli oraz wykresu, ponadto przedstawione są podstawowe parametry statystyczne.

Do badań przygotowano ok. 100 brykietów z 8 różnymi rodzajami lepiszcza. Jego udział zawierał się w granicach 5–10%. Badano również próbki kontrolne bez udziału lepiszcza. Próbki ściskano między płaskimi powierzchniami roboczymi zadając siłę wstępną 100 N. Wyniki badań, przedstawione w postaci krzywych ściskania brykietów, zestawiono na wspólnym wykresie (rys. 5.11), co umożliwiło porównanie przebiegu siły ściskającej dla brykietów z różnymi lepiszczami.

Stwierdzono duży wpływ środka wiążącego na wytrzymałość brykietów, przy czym niektóre lepiszcza wykazały wpływ pozytywny, inne negatywny



Rys. 5.11. Krzywe przebiegu sił ściskania przykładowych brykietów z prasy stemplowej z dodatkiem: a – kwasu octowego, b – melasy, c – szkła wodnego, d – rokrysolu, e – bez dodatków, f – PAW, g – wapna palonego, h – miału węglowego

w porównaniu do wytrzymałości brykietów bez lepiszcza. Niekorzystne okazało się stosowanie miału węglowego, wapna palonego oraz PAW, które nie powodowały polepszenia właściwości mechanicznych brykietów. Zastosowanie melasy, szkła wodnego czy rokrysolu jako lepiszcza spowodowało poprawę wytrzymałości na ściskanie. Najodporniejsze na ściskanie okazały się brykiety z kwasem octowym, który powoduje reakcję utleniania żelaza tworząc produkty korozji spełniające rolę mocnego spoiwa. Jednakże skutkiem tej reakcji jest szybko postępujące pękanie i rozwarstwianie struktury brykietu, oraz wydzielenie znacznej ilości ciepła.

Stwierdzono dosyć dużą wytrzymałość na ściskanie brykietów bez lepiszcza. Zaobserwowano również dużą kruchość tych brykietów w próbach zrzutu grawitacyjnego. Wystąpiła zatem konieczność stosowanie lepiszcza, które wiąże strukturę brykietu i nadaje mu większą odporność na zrzut grawitacyjny.

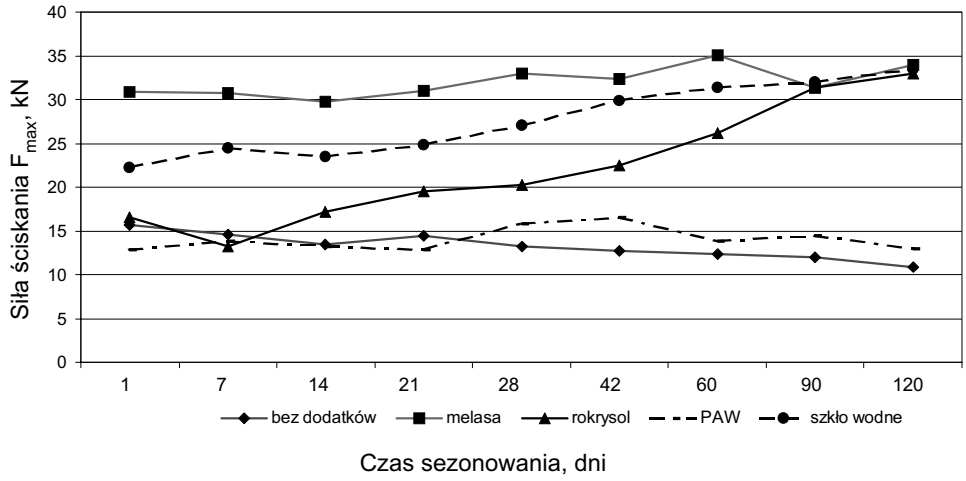
Spośród badanych środków wiążących dodatek melasy, szkła wodnego i rokrysolu, umożliwia uzyskanie brykietów o wysokiej wytrzymałości na ściskanie (rys. 5.11). Brykiety te poddano dalszym badaniom w celu sprawdzenia i porównania ich odporności na zrzut grawitacyjny. Badanie polegało na trzykrotnym zrzuceniu próbki liczącej po 10 szt. brykietów z wysokości 2 m na stalową płytę o grubości 20 mm. Odporność na zrzut określono ze wzoru 5.1. W tabeli 5.8 przedstawiono wartości średnie z pomiarów i obliczeń.

Stwierdzono, że brykiety, które posiadały dobrą wytrzymałość na ściskanie charakteryzowały się również dużą odpornością na zrzut – osiągały wartości powyżej wymaganego minimum (>90%). Powyższe wyniki potwierdzają, że brykiety bez lepiszcza nie kwalifikują się do hutniczego wykorzystania. Najlepszą odporność na zrzut grawitacyjny wykazały brykiety z melasą.

Istotne jest, aby zachowanie wytrzymałości brykietów występowało w dłuższym okresie czasu. W tym celu zbadano wpływ sezonowania na wytrzymałość brykietów z wybranymi rodzajami środków wiążących oraz bez lepiszcza. Sezonowanie prowadzono w warunkach laboratoryjnych przez okres do 120 dni. Wyniki badań przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 5.12.

Tabela 5.8. Wyniki badań właściwości mechanicznych brykietów w zależności od rodzaju lepiszcza

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Siła niszcząca brykiet, kN	Odporność na zrzut, %	Wytrzymałość na ściskanie, kN/cm^2
1.	Melasa	32,9	99,48	4,66
2.	Szkło wodne	26,8	96,37	3,79
3.	Rokrysol	21,2	92,44	3,00
4.	Bez lepiszcza	16,1	81,30	2,28



Rys. 5.12. Zmiana wartości siły maksymalnej ściskania podczas sezonowania brykietu

Stwierdzono, że w niektórych przypadkach sezonowanie brykietów wpływa negatywnie na ich odporność mechaniczną. Najbardziej widoczne było to w brykietach z dodatkiem kwasu octowego, gdzie w okresie 15–30 dni następowało pękanie i rozwarstwianie, a w efekcie znaczne osłabienie wyrobu. Sezonowanie brykietów z dodatkiem melasy, szkła wodnego oraz rokrysolu jako lepiszcza jest korzystne. Stwierdzono dalszy wzrost wytrzymałości brykietów na ściskanie podczas ich sezonowania.

W dalszych badaniach eksperymentalnych skoncentrowano uwagę na dokładniejszym sprawdzeniu przydatności melasy w roli lepiszcza (tab. 5.9). W pierwszej kolejności określono najkorzystniejszy jej udział w odpadowej mieszaninie do brykietowania. W tym celu określono wytrzymałość na ściskanie oraz odporność na zrzut dla brykietów o różnej zawartości melasy. Pomiary prowadzono dla brykietów świeżych i sezonowanych przez okres co najmniej

Tabela 5.9. Wytrzymałość brykietów w zależności od udziału procentowego melasy

Lp.	Zawartość melasy, %	Wytrzymałość na ściskanie, kN/cm^2		Odporność na zrzut, %	
		brykiet świeży	brykiet sezonowany	brykiet świeży	brykiet sezonowany
1.	4	2,39	3,43	83,30	86,60
2.	6	2,66	4,26	96,67	97,28
3.	8	3,00	4,44	99,89	99,12
4.	10	2,56	4,08	95,44	98,77

5 dni. Wyniki pomiarów i obliczeń przedstawione w tabeli 5.9 wykazały, że najlepsze brykiety w prasie stemplowej można uzyskać dodając melasę w ilości ok. 8% początkowej masy odpadu.

Wpływ wilgotności materiału odpadowego

Dalsze badania wytrzymałościowe przeprowadzone dla brykietów z dodatkiem melasy w ilości 8% miały na celu precyzyjne określenie wpływu początkowej wilgotności mieszaniny odpadowej podawanej do scalania. Pomiary przeprowadzono dla brykietów świeżych i sezonowanych, a ich wyniki przedstawiono w tabeli 5.10. Dane te potwierdzają, ze korzystne jest brykietowanie w prasie stemplowej materiału o wilgotności w zakresie 4,5–5,5%.

Tabela 5.10. Wytrzymałość brykietów z dodatkiem 8% melasy w zależności od początkowej wilgotności materiału

Lp.	Wilgotność materiału, %	Wytrzymałość na ściskanie, kN/cm^2		Odporność na zrzut, %	
		brykiet świeży	brykiet sezonowany	brykiet świeży	brykiet sezonowany
1.	2,0	2,42	3,98	96,55	97,80
2.	3,2	2,66	4,08	98,16	99,57
3.	4,5	2,96	4,53	99,50	99,85
4.	5,2	3,17	4,69	99,52	99,78
5.	6,5	2,68	4,12	96,50	98,65
6.	7,4	2,34	3,74	86,33	93,50

Analizując przeprowadzone badania własne określono, że osiągnięcie najkorzystniejszych warunków brykietowania oraz wymaganej jakości brykietów w prasie stemplowej PH-20 jest możliwe pod warunkiem spełnienia następujących wymogów:

- stosowanie melasy jako jedynego składnika lepiszcza w ilości ok. 8%,
- doprowadzenie materiału do wilgotności ok. 5%,
- przeprowadzenie brykietowania ok. 50 g masy odpadu przy nacisku jednostkowym stempla 20 MPa,
- sezonowanie po brykietowaniu przez okres 5–30 dni.

Zalety brykietowania w prasie stemplowej przedstawiają się następująco:

- łatwość uzyskania brykietów o jednorodnej strukturze,
- brak konieczności stosowania dużych nacisków stempla,
- prosta konstrukcja zespołu formującego.

Wady stosowania brykieciarki stemplowej określają:

- niska wydajność urządzenia,
- duży koszt wytworzenia brykietu,
- duża energochłonność,
- brak możliwości stosowania układu formującego umożliwiającego otrzymanie brykietów o kształcie pozbawionym ostrych krawędzi.

Zauważono, że w próbach zrzutu grawitacyjnego większą odporność wykazały próbki spadające na płaszczyznę zaokrągloną, a mniejszą, gdy spadały na krawędzie lub powierzchnię płaską walca. Potwierdza to słuszność konstruowania takiej matrycy i stempla, aby brykiety pozbawione były ostrych krawędzi.

Stosowanie prasy stemplowej może być nieefektywne w warunkach przemysłowych, gdzie istnieje potrzeba szybkiego przerobu dużej masy odpadów. Coraz powszechniej stosuje się prasy walcowe do brykietowania drobnoziarnistych odpadów metalowych. Układy formujące pras walcowych umożliwiają uzyskanie brykietów pozbawionych ostrych krawędzi. Brykieciarki walcowe posiadają następujące zalety: ciągły charakter pracy, możliwość uzyskania dużej wydajności, mniejsze zużycie energii oraz dłuższa żywotność elementów formujących. Zastosowanie brykieciarki walcowej do przetwarzania łożyskowych odpadów poszlifierskich wymagało podjęcia dalszych badań eksperymentalnych, których wyniki przedstawiono w następnym rozdziale.

5.7. Badania procesu brykietowania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w prasie walcowej

Brykietowanie metalowych odpadów poszlifierskich w prasie walcowej stanowi efektywny i skuteczny sposób przetwarzania w celu hutniczej utylizacji. W przypadku stosowania odpadów łożyskowych teza ta wymaga potwierdzenia poprzez przeprowadzenie badań eksperymentalnych. W tym celu podjęto następujące działania:

1. Dobrano odpowiednią prasę walcową wraz z układem formującym.
2. Określono sposób przygotowania materiału do brykietowania.
3. Przeprowadzono badania wytrzymałościowe brykietów.

Do realizacji badań wykorzystano wyniki dotychczasowych doświadczeń scalania w prasie stemplowej stosując kryteria przydatności brykietów do procesów hutniczych.

Dobór specjalistycznej prasy walcowej wraz z układem formującym

Badania możliwości brykietowania łożyskowych odpadów poszlifierskich w sposób ciągły realizowano przy pomocy instalacji doświadczalnej AGH w Krakowie. Istotnym jej elementem jest laboratoryjna prasa walcowa oznaczona symbolem LPW 450 opisana w rozdziale 4.2.

Uwzględniając specyfikę i właściwości łożyskowych odpadów poszlifierskich przeznaczonych do brykietowania w prasie walcowej, zmodernizowano napęd główny prasy oraz układ regulacji prędkości obrotowej silnika. Modernizacja obejmowała zakup i instalację:

- motoreduktora serii Drive 6000 z silnikiem asynchronicznym o mocy 22,0 kW i przekładnią cykloidalną o przełożeniu $i = 15$,
- przemiennika częstotliwości firmy Mitsubishi Electric z filtrem przeciwzakłóceniowym.

Układ napędowy zapewnia płynną regulację wartości prędkości obwodowej walców w zakresie 0,1–0,5 m/s. W klatce walców formujących znajdują się dwa walce o średnicy 450 mm – nieprzesuwny oraz przesuwny. Maksymalna wartość siły docisku walca przesuwnego wynosi 220 kN. Biorąc pod uwagę właściwości łożyskowych odpadów poszlifierskich, zdecydowano się na wyposażenie prasy laboratoryjnej LPW 450 w zasyp grawitacyjny i pierścienie formujące przeznaczone do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału.

Przygotowanie materiału i ocena podatności na brykietowanie

Przygotowanie materiału odpadowego do brykietowania polegało na uśrednieniu określonych ilości komponentów i suszeniu mieszanki. Jako lepiszcze wykorzystano melasę dodawaną w ilości 8% masy osadu pofiltracyjnego. Do uśredniania i suszenia mieszanki stosowano laboratoryjną mieszarkę „zetową" z podgrzewanym płaszczem do temperatury ok. 80 °C. Do badań przygotowano partie materiału o wilgotności w zakresie 2,6 – 6,7%.

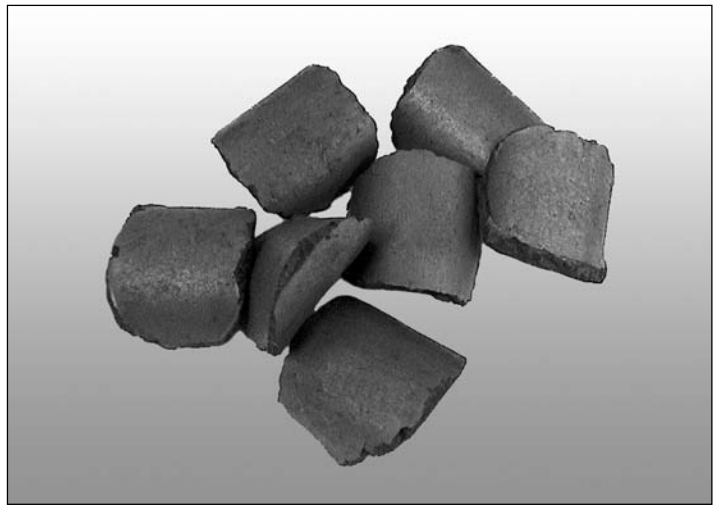
Ocenę podatności na brykietowanie dokonuje się na podstawie wyznaczonych eksperymentalnie charakterystyk zagęszczenia z uwzględnieniem zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego [3]. W analizie badawczej ocenę podatności na brykietowanie podjęto w oparciu o wyniki wstępnych prób brykietowania oraz wyniki badań wytrzymałościowych.

Na podstawie prób wstępnych scalania materiału o wilgotności 2,0% dobrano następujące parametry procesu:

- prędkość obwodowa walców $v = 0{,}2$ m/s,
- wartość nacisku jednostkowego $P = 130$ MPa,

- moment obrotowy M = 26 kNm,
- szczelina między walcami a = 1,5 mm.

Brykiety gromadzono w specjalnym pojemniku, skąd pobierano je do oceny efektów brykietowania. Wygląd brykietu z prasy walcowej pokazano na rysunku 5.13.



Rys. 5.13. Brykiety z prasy walcowej

Stwierdzono dobrą podatność na brykietowanie w prasie walcowej łożyskowych odpadów poszlifierskich z dodatkiem melasy. Brykiety posiadały zwartą, jednorodną strukturę i nie ulegały rozkruszeniu spadając do pojemnika po opuszczeniu układu formującego. Średnia masa brykietu wynosiła 24,6 g, a jego objętość 8,5 cm^3.

Badania brykietów z punktu widzenia ich przydatności w procesach hutniczych

Przeprowadzono ocenę podatności odpadów łożyskowych na brykietowanie w prasach walcowych oraz sprawdzono jakość uzyskanych wyrobów zarówno świeżych, jak i sezonowanych. Wykonane prace badawcze obejmowały:

1. Ocenę hutniczej przydatności brykietów świeżych i sezonowanych.
2. Sprawdzenie wodoodporności brykietów.
3. Badania wpływu początkowej wilgotności materiału na wytrzymałość brykietów.

Ocena hutniczej przydatności brykietów świeżych i sezonowanych

Brykietowano przygotowaną mieszankę odpadów poszlifierskich z melasą o wilgotności ok. 6%. Część brykietów składowano do sezonowania na okres 120 godzin. Próby ściskania wykonywano na maszynie wytrzymałościowej ZWICK 1120 będącej na wyposażeniu laboratorium Katedry Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie. Odporność na zrzut określano poprzez trzykrotne zrzucanie próbki (10 sztuk) brykietów z wysokości 2,0 m na stalową płytę o grubości 120 mm. Następnie przesiewano brykiety przez sito o rozmiarze oczek 18 × 18 mm i wykorzystując wzór 5.1 obliczono procentowy ubytek masy. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.11.

Tabela 5.11. Wyniki badań właściwości mechanicznych brykietów z prasy walcowej

Nr próby	Siła niszcząca brykiet, N		Odporność na zrzut grawitacyjny, %	
	brykiet świeży	brykiet sezonowany	brykiet świeży	brykiet sezonowany
1	793	1222	96,5	96,7
2	720	1104	96,9	96,5
3	709	1098	95,5	96,8
4	694	943	95,6	96,6
5	685	924	95,9	96,2
6	739	1188	97,9	97,7
Średnia	723	1080	96,4	96,8

Stwierdzono dobrą podatność odpadów poszlifierskich na scalanie w prasie walcowej. Uzyskano trwałe i wytrzymałe mechanicznie brykiety dodając melasę jako lepiszcze. Brykiety wykazują wystarczającą wytrzymałość nawet tuż po ich wytworzeniu, jednak korzystne jest ich sezonowanie, gdyż występuje dalszy wzrost ich odporności mechanicznej. Parametry wytrzymałościowe spełniają dopuszczalne wymogi hutnictwa, istnieje więc możliwość wykorzystania brykietów jako wsad pieca stalowniczego.

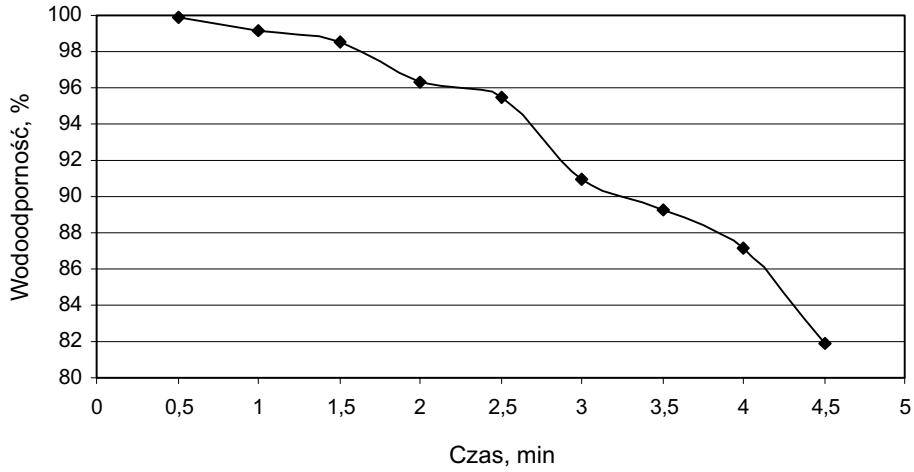
Wodoodporność brykietów

Badania wodoodporności brykietów polegały na całkowitym ich zanurzeniu w wodzie i określeniu ich procentowego ubytku masy w trakcie procesu. Wodoodporność obliczono ze wzoru:

$$W = \frac{M}{M_p} \cdot 100\% \tag{5.18}$$

gdzie: *Mp* – masa początkowa brykietów, *M* – masa brykietu w danym okresie nawadniania

Wyniki badań pokazano na rysunku 5.14.



Rys. 5.14. Wyniki badań wodoodporności brykietów

Brykiety wykazały dobrą wodoodporność – dopuszczalny 10% ubytek masy wykazały po przeszło 3 min. całkowitego zanurzenia. Należy zwrócić uwagę, że w praktyce brykiety rzadko będą całkowicie zanurzone w wodzie. Podczas transportu, nawet przy ulewnym deszczu, mogą być narażone jedynie częściowo na oddziaływanie wody.

Wpływ wilgotności materiału na właściwości mechaniczne brykietów

Badania miały na celu sprawdzenie wpływu wilgotności mieszanki odpadów z melasą na parametry wytrzymałościowe brykietów. Mieszankę brykietowano przy różnych wartościach nacisku jednostkowego walców. Badano brykiety tuż po ich wytworzeniu oraz po 120 godzinach sezonowania. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5.12.

Stwierdzono, że pozytywne rezultaty uzyskuje się brykietując materiał o wilgotności w zakresie 4,45 – 6,72. Ze względu na ograniczenia dotyczące zawartości wody we wsadzie do pieca stalowniczego wilgotność powinna być bliska dolnej

Tabela 5.12. Wpływ wilgotności materiału i nacisku jednostkowego na właściwości mechaniczne brykietów z prasy walcowej

Nr próby	Wilgotność materiału, %	Wartość nacisku jednostkowego, MPa	Siła niszcząca brykiet, N		Odporność na zrzut, %	
			brykiet świeży	brykiet sezonowany	brykiet świeży	brykiet sezonowany
1	2,60	110,0	723	1080	96,4	96,8
2	3,80	94,6	521	503	87,6	84,0
3	4,45	72,1	451	625	89,6	90,0
4	4,99	65,0	665	969	88,4	94,5
5	6,23	43,4	765	1423	96,0	99,4
6	6,72	41,4	553	1024	98,3	99,7

granicy podanego przedziału. Z kolei brykietowanie mieszanki o niższej wilgotności wymaga stosowania wyższych nacisków jednostkowych, tym samym proces staje się bardziej energochłonny. Korzystne wartości nacisku zawierają się w przedziale 40 – 75 MPa.

Należy zwrócić uwagę, że w niektórych przypadkach siła niszcząca brykiety uzyskane w tym doświadczeniu jest niższa od zalecanej wartości 700 N. Wiadomo jednak, że brykieciarka przemysłowa posiada średnicę walców o 50 mm większą niż brykieciarka laboratoryjna, wobec tego brykiety przemysłowe będą również większe. Z dotychczasowych prób wynika [5], że wytrzymałość na ściskanie brykietu przemysłowego będzie większa od laboratoryjnego, przy czym odporność na zrzut grawitacyjny nie zmieni się. Można zatem przyjąć kryterium mniejszej siły niszczącej brykiet niż 700 N.

5.8. Analiza mikroskopowa struktury brykietów

Przeprowadzenie badań struktury brykietów miało na celu obserwację i pomiary następujących parametrów:

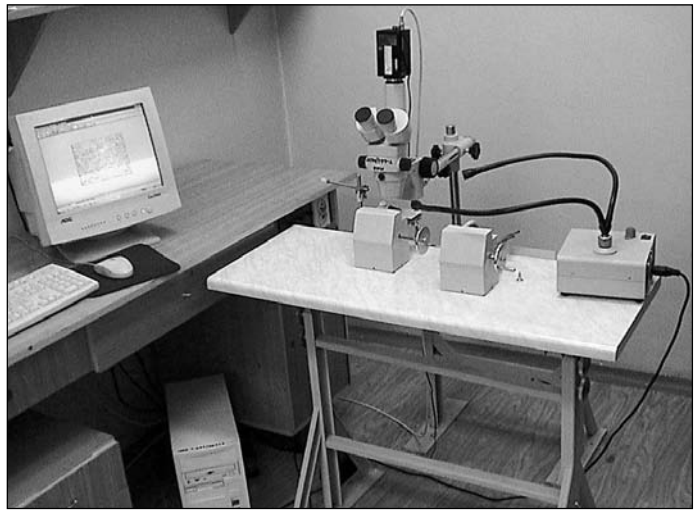
- kształtu i wymiarów ziaren odpadu przed scalaniem,
- ułożenia ziaren w brykietach po scaleniu,
- lokalizację i strukturę lepiszcza w przekroju brykietu,
- wad strukturalnych: pęcherze, pęknięcia, odpryski itp.

Obserwacje dotyczyły zarówno brykietów z prasy stemplowej jak i walcowej. Analizy wykonano wykorzystując specjalne stanowisko badawcze znajdujące się w laboratorium Katedry Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej.

Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze do analiz struktury materiałów, pokazane na rysunku 5.15, składa się z następujących elementów:

- mikroskop firmy Nikon umożliwiający powiększenie do 300×,
- kamera firmy Panasonic,
- karta TV do „przechwytywania" obrazów cyfrowych przekazywanych przez kamerę,
- komputer PC z programem „MicroScan for Windows" pozwalający na pobieranie, przetwarzanie i analizę obrazu.

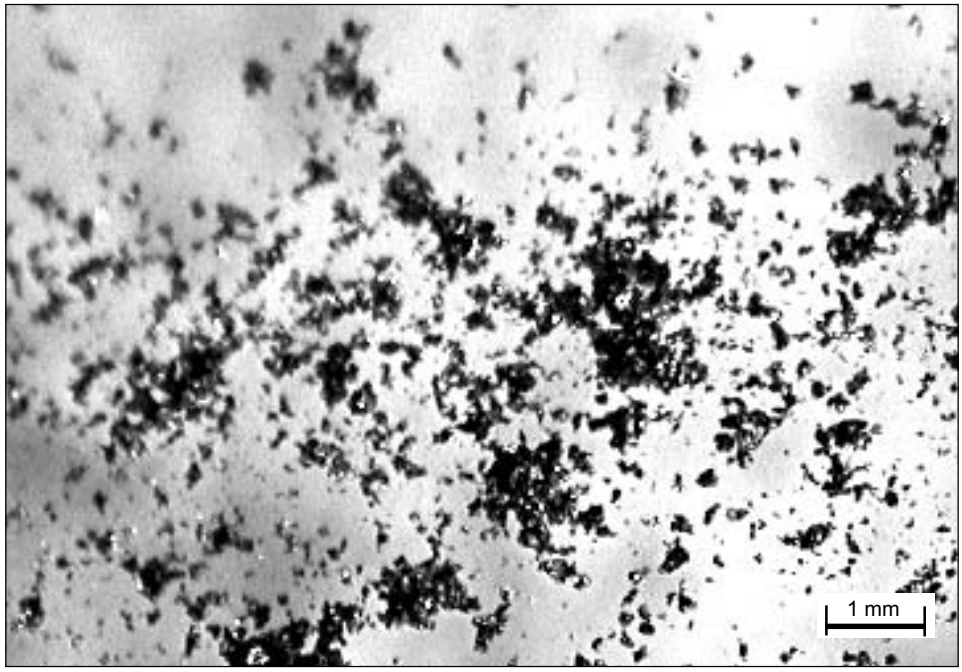


Rys. 5.15. Fotografia stanowiska do analizy struktury brykietów

Program MicroScan v. 1.3 umożliwia obróbkę pobranego obrazu mikroskopowego poprzez ustawienie jasności, kontrastu bądź nasycenia. Wykorzystać można także zestaw funkcji filtrujących, arytmetyczno-logicznych, poprawy kontrastu i segmentacji. Program pozwala dokonać pomiarów wielkości geometrycznych i obliczeń wielkości średnich, a także pola powierzchni czy obwodu.

Określenie wielkości ziarna odpadu

Ziarna posiadają kształty nieregularne – zarówno podłużne, jak i zaokrąglone. Kształt i wygląd ziaren łożyskowych odpadów poszlifierskich przed scalaniem pokazano na rysunku 5.16. Stwierdzono, że ziarna odpadów łatwo sczepiają się ze sobą tworząc większe aglomeraty – również widoczne na zdjęciu.



Rys. 5.16. Wygląd ziarn łożyskowych odpadów poszlifierskich

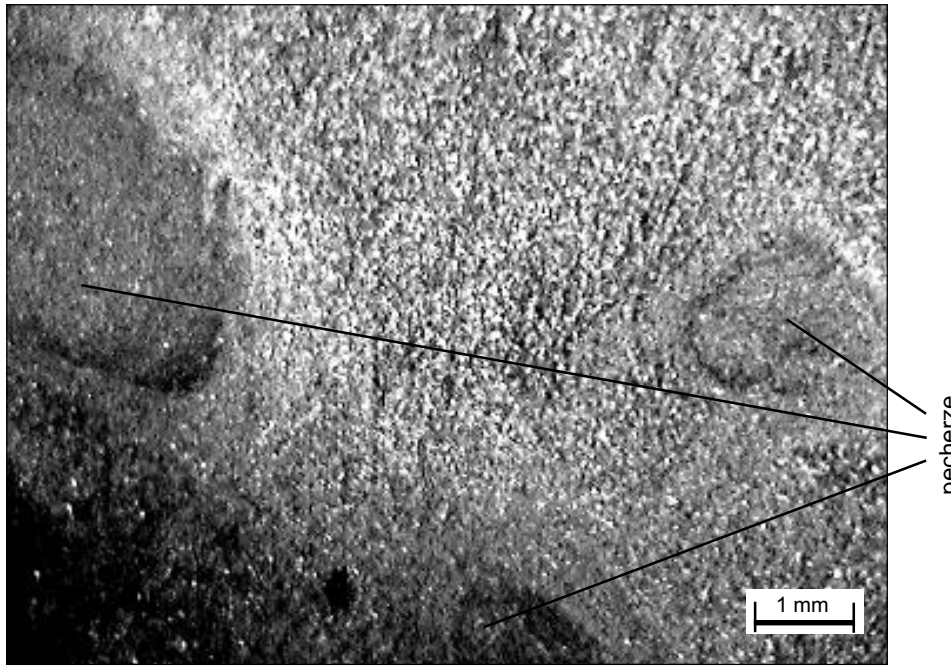
Dokonano pomiarów średnicy ziaren oraz odpowiadających im pól powierzchni. Typowe średnice pojedynczych ziaren odpadów zawierają się w granicach 0,02–0,06 mm, a ich pola powierzchni wynoszą średnio 0,0013 mm^2. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5.13.

Na rysunku 5.17 przedstawiono zdjęcie fotograficzne struktury fragmentu odwodnionego filtratu z łożyskowych odpadów poszlifierskich otrzymanego w płytowej prasie filtracyjnej. Widoczne są pęcherze oraz niejednorodności. Nie stwierdzono występowania ciał obcych.

Zauważono, że filtraty w procesie suszenia mają tendencje do samoczynnego scalania i stają się dość twardym, a jednocześnie kruchym materiałem wymagającym rozdrobnienia przed brykietowaniem. Po rozdrobnieniu należy dodać melasy i dokładnie wymieszać, przy czym uzyskanie bardziej jednorodnej struktury materiału do brykietowania zależy od intensywności i sposobu mieszania. Materiał do brykietowania w prasie stemplowej mieszano ręcznie, natomiast przygotowując materiał do brykietowania w prasie walcowej wykorzystano mieszarkę zetową z elektrycznie podgrzewanym płaszczem.

Tabela 5.13. Wymiary geometryczne ziarn łożyskowych odpadów poszlifierskich

L.p.	Średnica ziarna, mm	Pole powierzchni, mm^2
1.	0,043	0,0015
2.	0,055	0,0024
3.	0,031	0,0008
4.	0,054	0,0023
5.	0,026	0,0005
6.	0,021	0,0003
7.	0,019	0,0003
8.	0,059	0,0027
9.	0,022	0,0004
10.	0,042	0,0014
Średnia	0,037	0,0013



Rys. 5.17. Struktura filtratu z łożyskowych odpadów poszlifierskich

Struktura brykietów z prasy stemplowej

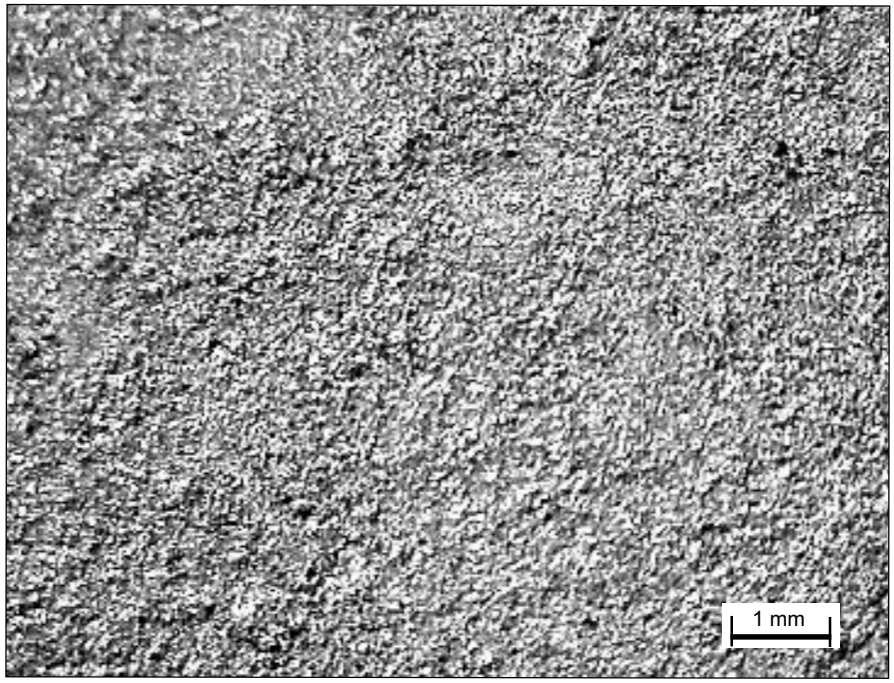
Do analizy struktury pobrano brykiety zarówno z lepiszczem jak bez lepiszcza. Przed przystąpieniem do badań powierzchnię brykietu przygotowano poprzez jej szlifowanie pilnikiem i papierem ściernym. Badania polegały na dobraniu odpowiedniego powiększenia fragmentu powierzchni, a następnie zarejestrowaniu obrazu i zapisaniu go na dysk komputera. Następnie „przechwycony" obraz poddano cyfrowej obróbce komputerowej z wykorzystaniem programu „MicroScan". Wyniki obserwacji mikroskopowych wybranych próbek scalanych na prasie stemplowej przedstawiono na rysunkach 5.18–5.23.

Struktura brykietu z łożyskowego odpadu poszlifierskiego bez lepiszcza, widoczna na rysunku 5.18, jest jednorodna, bez widocznych pęcherzy i pęknięć. Ułożenie ziaren jest nieregularne.

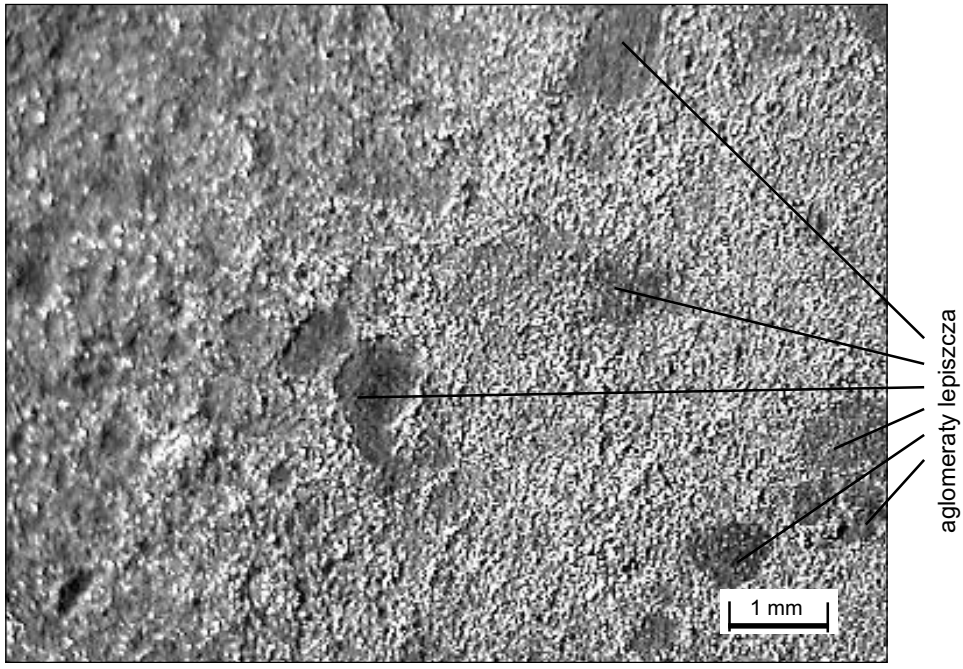
Struktura brykietów z lepiszczami, pokazana na rysunkach 5.19–5.23, wyraźnie różni się od brykietu bezlepiszczowego. Dobrze widoczne są ciemniejsze płaszczyzny – aglomeraty lepiszcza. Na rysunku 5.19 pokazano rozmieszczenie szkła wodnego, natomiast na rysunku 5.20 widać efekt zastosowania kwasu octowego. Widoczne są nieregularne jaśniejsze płaszczyzny stanowiące produkty reakcji utleniania żelaza. Dobrze widoczne są pęcherze i pęknięcia powodujące osłabienie struktury. Szczeliny te szybko powiększają się podczas sezonowania, co dyskwalifikuje brykiet do użytkowego wykorzystania. Pęknięcia zauważono też w niektórych brykietach z dodatkiem rokrysolu, jak pokazano na rysunku 5.21. Substancja ta również nie jest odpowiednia do stosowania jako lepiszcze.

Wpływ udziału melasy na strukturę brykietu można zauważyć porównując rysunki 5.22 i 5.23. Stwierdzono, że niewielkie zmiany udziału procentowego melasy w masie brykietu są przyczyną znacznych różnic w budowie strukturalnej. Widoczne to jest na rysunku 5.23 w postaci wyraźnie większego udziału aglomeratów lepiszcza w porównaniu do rysunku 5.22.

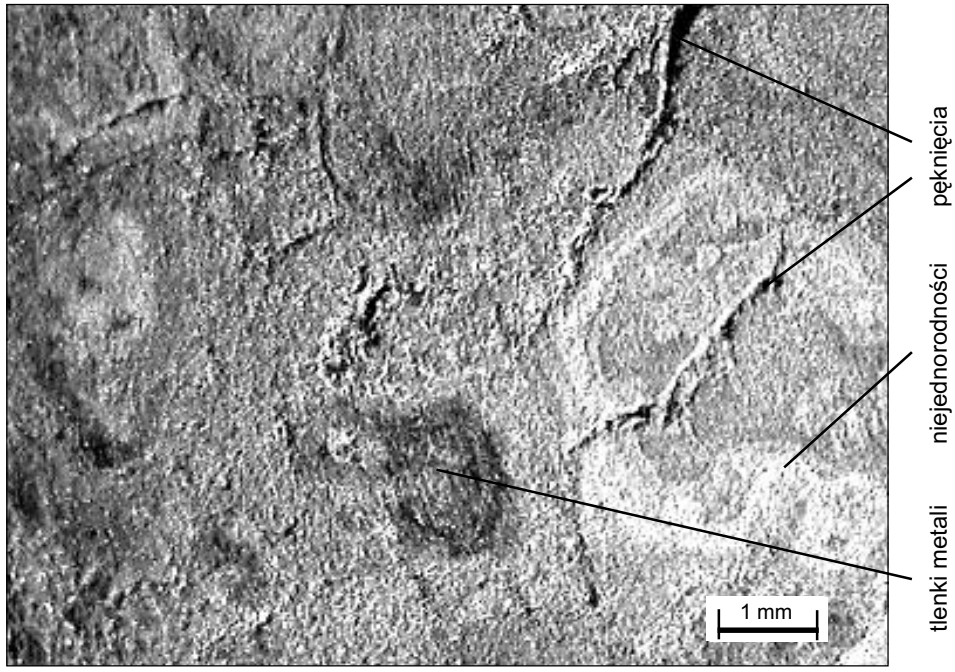
Analizując zdjęcia fotograficzne brykietów z dodatkiem melasy (rys. 5.22 i 5.23) nie stwierdzono widocznych wad w postaci pęcherzy i pęknięć wewnątrzstrukturalnych, co uzasadnia celowość stosowania tego lepiszcza w praktyce przemysłowej. Analiza wykazała ponadto duże znaczenie dokładnego mieszania składników.



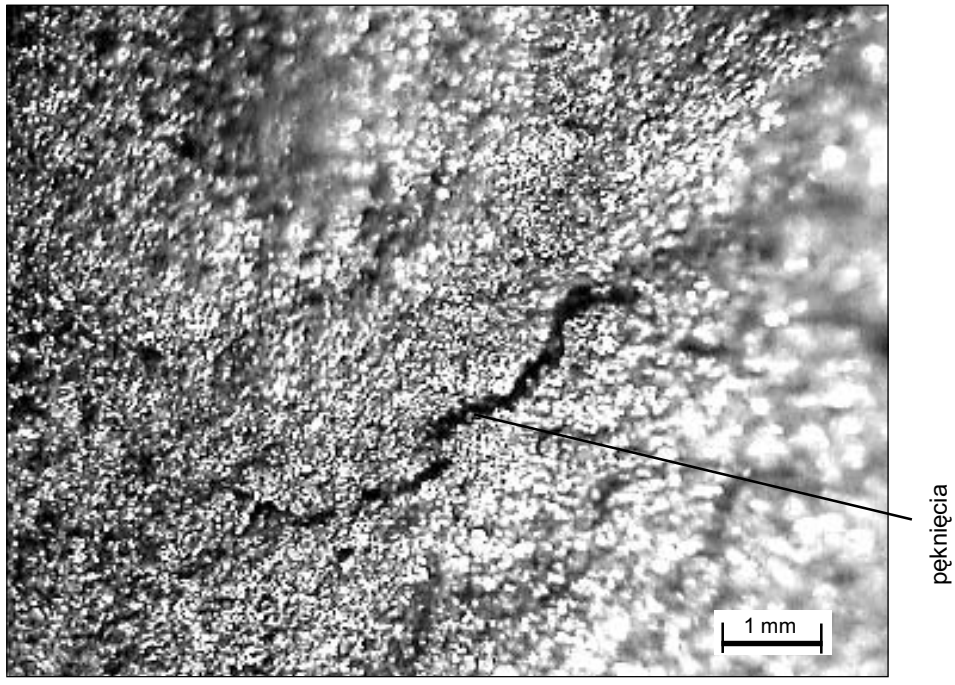
Fot. 5.18. Struktura brykietu z łożyskowego odpadu poszliferskiego bez lepiszcza



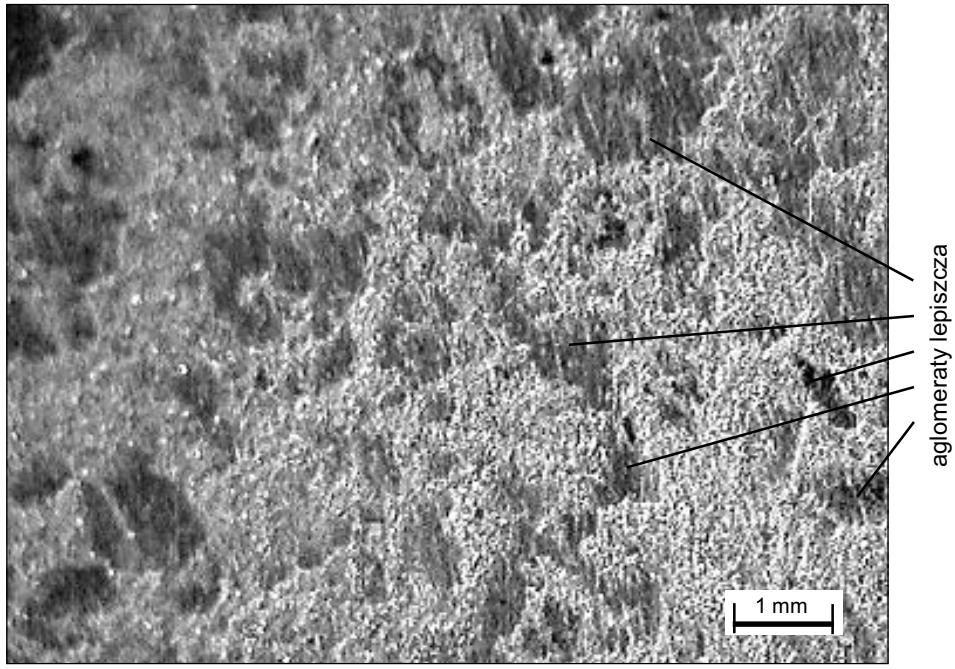
Fot. 5.19. Struktura brykietu z dodatkiem 10% szkła wodnego



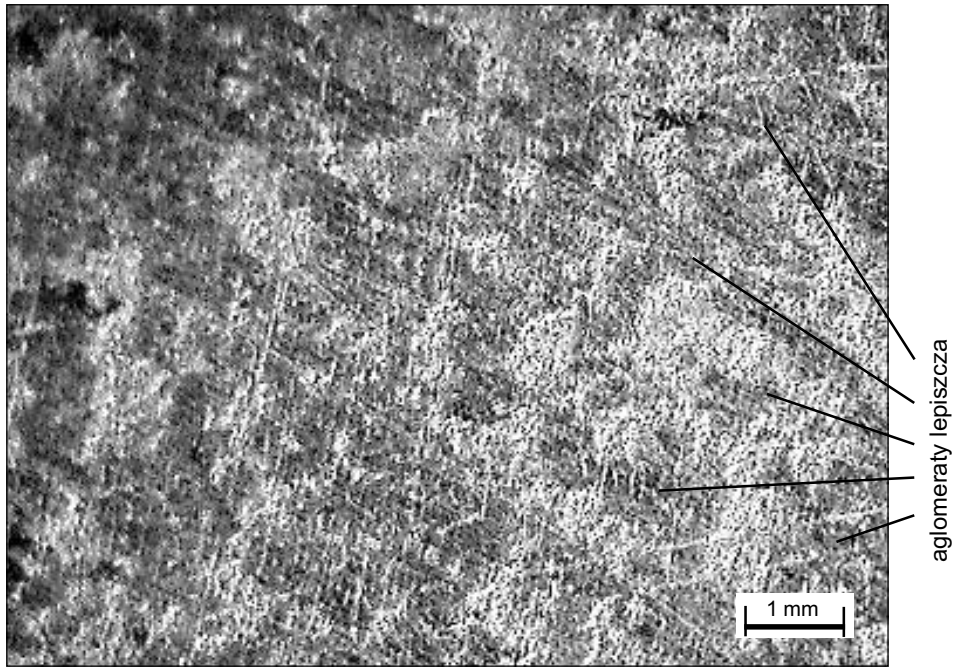
Fot. 5.20. Struktura brykietu z dodatkiem 5% kwasu octowego



Fot. 5.21. Struktura brykietu z dodatkiem 8% rokrysolu



Fot. 5.22. Struktura brykietu z dodatkiem 6% melasy



Fot. 5.23. Struktura brykietu z dodatkiem 9% melasy

Struktura brykietów z prasy walcowej

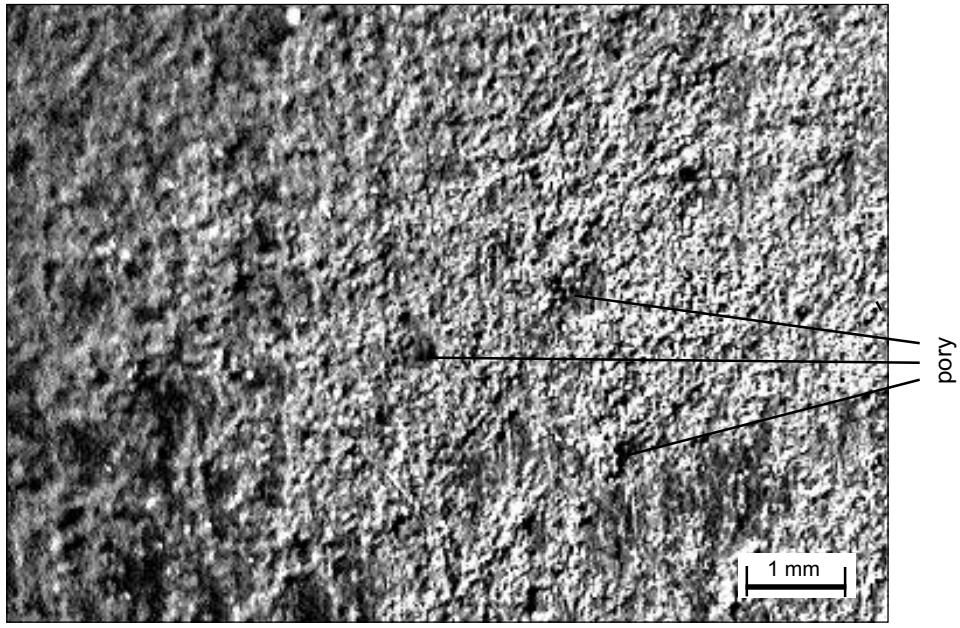
Przygotowanie brykietów z prasy walcowej do badań analizy struktury polegało na zdjęciu powierzchniowej warstwy materiału poprzez szlifowanie pilnikiem oraz papierem ściernym. Badania przeprowadzono w sposób podobny jak dla brykietów z prasy walcowej. Obserwowano strukturę brykietów z lepiszczem jedno- i dwuskładnikowym. Przykładowe zarejestrowane obrazy fotograficzne przedstawiono na rysunkach 5.24 oraz 5.25.

Analizując uzyskane fotografie stwierdzono, że brykiety z prasy walcowej posiadają strukturą jednorodną, bez widocznych pęknięć i pęcherzy. Struktura badanych brykietów jest bardziej równomierna niż brykietów z prasy stemplowej, co prawdopodobnie wynika z dokładniejszego wymieszania składników mieszanki w mieszarce zetowej. Na rysunku 5.24 widoczna jest struktura brykietu z lepiszczem dwuskładnikowym zawierającym wapno hydratyzowane.

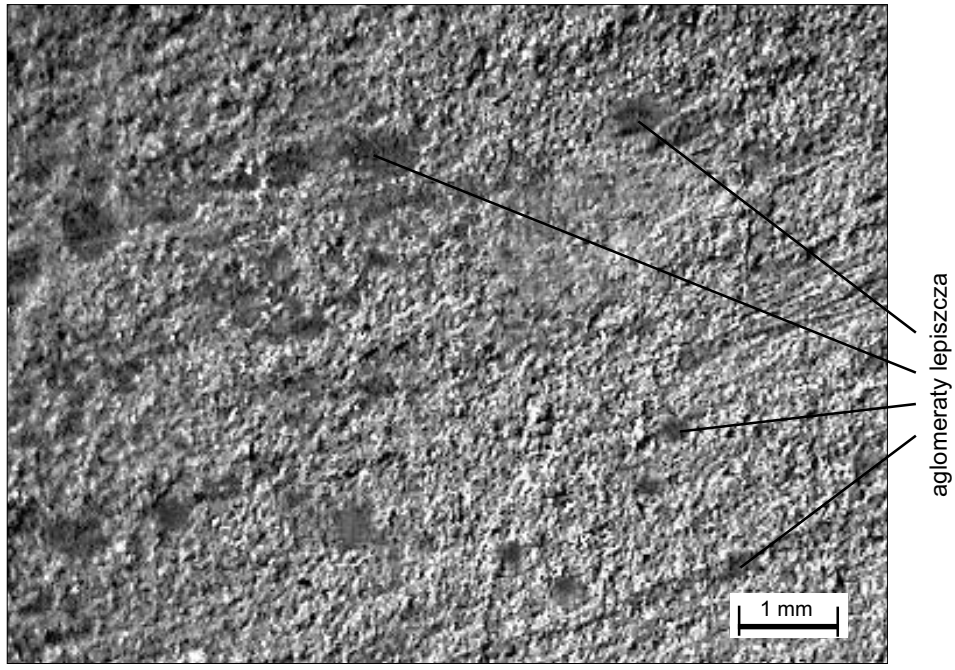
Struktura brykietu zawierającego wapno hydratyzowane jest bardziej porowata niż struktura brykietów z melasą, gdzie nie stwierdzono widocznych wad struktury (rys. 5.25). Potwierdza to, że melasa z powodzeniem może być jedynym składnikiem lepiszcza.

Strukturę brykietu z prasy walcowej z dodatkiem melasy pokazano na rysunku 5.25. Widoczne na rysunku 5.25 ciemniejsze plamy są skupiskami środka wiążącego. Są one mniejsze i gęściej rozłożone w porównaniu z przedstawionymi na rysunkach 5.22 i 5.23.

Podsumowując, badania struktury potwierdzają przydatność brykietów z dodatkiem melasy scalanych w prasie walcowej do użytkowego wykorzystania w hutnictwie.



Rys. 5.24. Struktura brykietu z prasy walcowej z lepiszczem dwuskładnikowym zawierającym wapno hydratyzowane

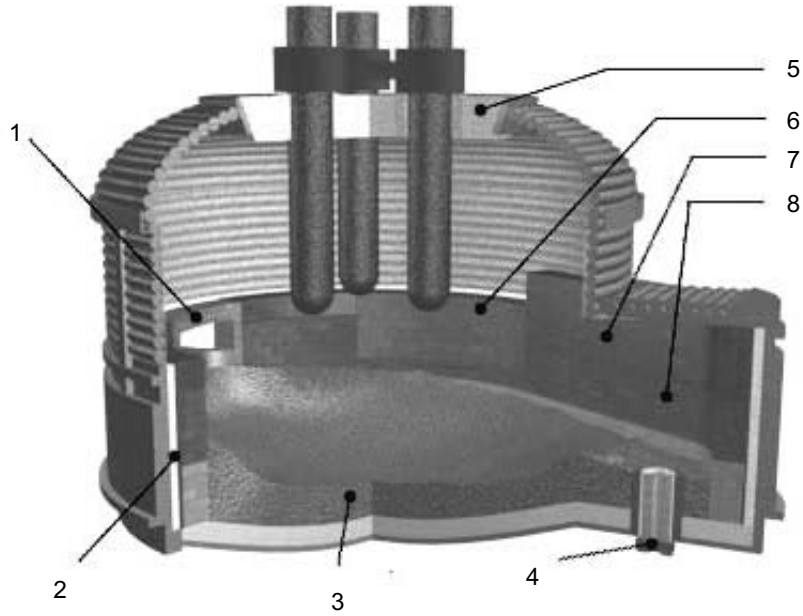


Rys. 5.25. Struktura brykietu z prasy walcowej z dodatkiem melasy

5.9. Ocena przydatności brykietów dla przemysłu hutniczego

Badania własne wykazały, że odpady poszlifierskie przemysłu łożyskowego mogą z powodzeniem stanowić komponent wsadu pieców hutniczych. Warunkiem hutniczego wykorzystania odpadów jest nadanie im postaci kawałkowej poprzez scalanie. Korzystną i uzasadnioną ekonomicznie metodą scalania jest brykietowanie w prasie walcowej. Zakłada się, że brykiety powinny być przetapiane w łukowym piecu elektrycznym bądź konwertorze.

Piece łukowe elektryczne stosowane są do produkcji stali wysokogatunkowej. Wytwarzane są w nich stale stopowe, w tym stal łożyskowa. Na rysunku 5.26 pokazano elementy budowy pieca łukowego.

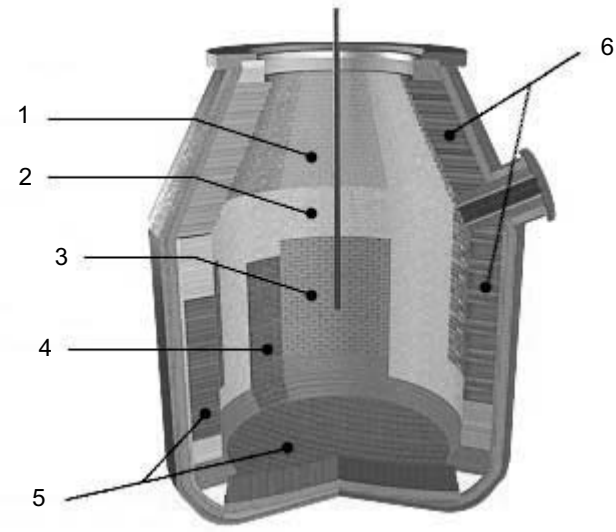


Rys. 5.26. Budowa łukowego pieca elektrycznego [8]:
1 – okno wsadowe, 2 – warstwa ochronna, 3 – trzon, 4 – otwór spustowy, 5 – sklepienie, 6 – strefa elektrod, 7 – ściany, 8 – strefa żużla

Przeznaczony do przetopu w piecu elektrycznym złom powinien zawierać jak najmniejszą ilość zanieczyszczeń. W przypadku wykorzystania brykietów z łożyskowych odpadów poszlifierskich do przetopu w piecu elektrycznym należy sprawdzić zawartość niepożądanych domieszek, a w szczególności określić udział chromu w masie wsadu.

Do przetopu brykietów stosowane są również piece konwertorowe. W konwertorze z reguły otrzymuje się stal konstrukcyjną zwykłej jakości. Zastosowanie

konwertora dopuszcza większy udział zanieczyszczeń, które podczas wytapiania stali ulegają wypaleniu lub tworzą żużel. Schemat konwertora pokazano na rysunku 5.27.



Rys. 5.27. Budowa konwertora [8]:
1 – strefa stożków nad czopami, 2 – strefy najmniej obciążone, 3 – strefa czopów, 4 – strefy okołoczopowe, 5 – strefa wsadowa i dna, 6 – strefa spustowa

Przeprowadzono ocenę przydatności brykietów z łożyskowych odpadów poszlifierskich do przetapiania w piecu stalowniczym we współpracy z Zakładem Metalurgii Stopów Żelaza Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Badania przeprowadzono w laboratoryjnych piecach elektrycznych – indukcyjnym i łukowym – o pojemności do 10 kg [5].

Ogrzewając brykiety w piecu do wymaganej temperatury zauważono, że brykiety zachowują swoją strukturę w wyższych temperaturach i nie będą rozpadały się w kontakcie z płynnym metalem podczas podawania do kąpieli. Wytop badawczy odbywał się w specjalnie przygotowanym tyglu do którego umieszczono złom stalowy (stal niskowęglowa zwykłej jakości). Po załączeniu napięcia rozpoczęto proces nagrzewania i roztapiania wsadu. Jednocześnie porcjami podawano brykiety z odpadów łożyskowych. Po dodaniu całej zaplanowanej ilości brykietów kontynuowano nagrzewanie do całkowitego roztopienia wsadu oraz uzyskania temperatury około 1580 °C. Następnie przystępowano do odlewania uzyskanej fazy ciekłej. Odlewanie odbywało się po przechyleniu tygla

do specjalnie przygotowanej wlewnicy żeliwnej. Z uzyskanej zakrzepłej fazy metalicznej odcinano próbę metalu celem wykonania analizy składu chemicznego.

Realizując pierwszy wytop w piecu indukcyjnym stwierdzono, że roztapiające się brykiety powodowały intensywne tworzenie się fazy żużlowej (tlenkowej). Celem upłynnienia fazy żużlowej oraz zredukowania zawartych w niej tlenków żelaza dodano do kąpieli granulki aluminium w ilości 10% masy brykietów. Po kilkudziesięciu sekundach nastąpiło znaczne zmniejszenie intensywności pienienia oraz upłynnienie żużla. Kolejne wytopy wykonano w elektrycznym laboratoryjnym piecu łukowym i nie stwierdzono tutaj występowania fazy żużlowej. W piecu tym wykonano pięć wytopów badawczych. W tabeli 5.14 przedstawiono udział brykietów we wsadzie do pieca, natomiast wyniki badań składu chemicznego złomu stalowego, brykietów z odpadów łożyskowych oraz fazy metalicznej po przetopieniu przedstawiono w tabeli 5.15.

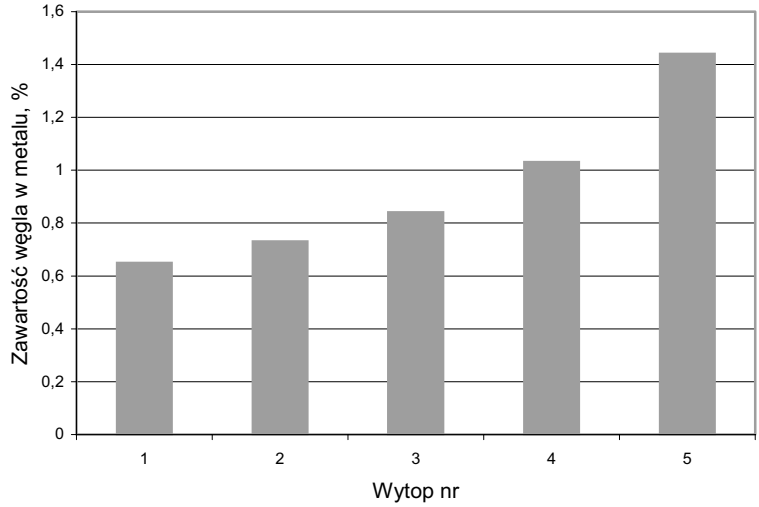
Tabela 5.14. Udział złomu stalowego i brykietów w wytopach badawczych w piecu łukowym

Numer wytopu	Masa złomu stalowego, kg	Masa brykietów, kg	Udział brykietów we wsadzie, %
1	2,5	0,5	16,7
2	2,0	1,0	33,3
3	1,5	1,5	50,0
4	1,0	2,0	66,7
5	0,5	2,5	83,3

Tabela 5.15. Skład chemiczny złomu stalowego, brykietów z odpadów łożyskowych, oraz wytopu metalowego w piecu łukowym

Rodzaj materiału	Zawartość pierwiastków, %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
Złom stalowy	0,18	0,43	0,160	0,03	0,02	0,13	0,07	0,18	0,05
Brykiety	3,30	0,30	0,530	0,03	0,02	1,37	0,03	0,16	0,39
Wytop nr:									
1.	0,65	0,34	0,003	0,02	0,02	0,03	0,06	0,10	0,01
2.	0,73	0,25	0,005	0,02	0,02	0,03	0,06	0,10	0,01
3.	0,84	0,18	0,007	0,02	0,02	0,04	0,06	0,10	0,01
4.	1,03	0,17	0,007	0,03	0,02	0,07	0,07	0,10	0,01
5.	1,44	0,16	0,008	0,03	0,02	0,07	0,07	0,10	0,01

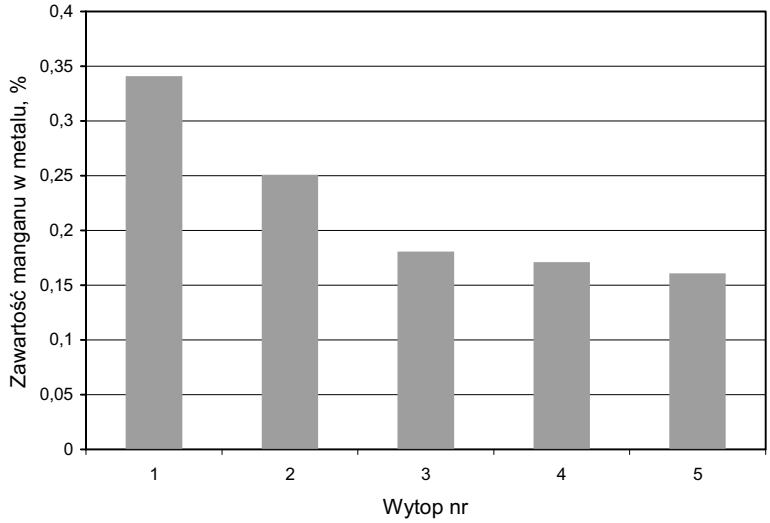
Dane przedstawione w tabeli 5.15 pokazują, że zawartość węgla w fazie metalicznej po roztopieniu wsadu zwiększa się wraz z udziałem brykietów we wsadzie. Na rysunku 5.28 przedstawiono zmiany zawartości węgla w kolejnych wytopach badawczych.



Rys. 5.28. Zmiany zawartości węgla w kolejnych wytopach badawczych przy roztapianiu wsadu w piecu łukowym

Zawartość węgla wynosi 0,65% przy udziale brykietów 16,7% oraz wzrasta do 1,44% przy udziale brykietów wynoszącym 83,3%. Korzystna zawartość węgla we wsadzie podczas przemysłowego procesu w stalowniczym piecu łukowym związana jest ze stosowaną techniką roztapiania. Przy przerobie złomu niestopowego w piecach o dużej pojemności stosuje się zazwyczaj intensywną technikę roztapiania złomu polegającą na wdmuchiwaniu do przestrzeni pieca 20–50 m^3 tlenu gazowego celem przyspieszenia roztapiania oraz spowodowania spienienia żużla. Technologia taka wymaga we wsadzie do procesu odpowiedniej ilości materiałów węglonośnych. Zawarty w nich węgiel utlenia się egzotermicznie z wydzieleniem gazowego CO oraz jest reduktorem do redukcji tlenków żelaza tworzących się przy intensywnym wdmuchiwaniu tlenu. Z tego względu zastosowanie brykietów z odpadów łożyskowych do wsadu pieca łukowego jest korzystne. Przyczyniając się do zwiększenia zawartości węgla we wsadzie umożliwia zmniejszenie ilości materiałów nawęglających, jakie są stosowane w praktyce przemysłowej.

Na rysunku 5.29 przestawiono zmiany zawartości manganu w kolejnych wytopach badawczych.



Rys. 5.29. Zmiany zawartości manganu w kolejnych wytopach badawczych przy roztapianiu wsadu w piecu łukowym

Zawartość manganu w fazie metalicznej po roztopieniu wsadu zmniejsza się wraz z udziałem brykietów we wsadzie. Zawartość manganu wynosi 0,34% przy udziale brykietów 16,7% oraz zmniejsza się do 0,16% przy udziale brykietów wynoszącym 83,3%. Zawartość manganu w brykietach wynosi 0,26%.

Zawartości pozostałych utleniających się składników kąpieli metalowej, takich jak krzem, fosfor, siarka, chrom i nikiel po roztopieniu wsadu uległa znacznemu zmniejszeniu i są zbliżone do ich zawartości w większości stali węglowych. Kontakt wsadu z tlenem atmosferycznym spowodował utlenienie tych składników. Nie ma więc też potrzeby zmniejszania udziału brykietów we wsadzie przeznaczonym do przetopu ze względu np. na chrom.

Stwierdzono, że dodanie brykietów do wsadu pieca łukowego spowodowało korzystne zmiany zawartości pierwiastków po jego przetopieniu. Skład chemiczny uzyskanej kąpieli metalowej jest zbliżony do składu chemicznego kąpieli powstałej po stopienia wyłącznie złomu.

5.10. Badanie szkodliwości emisji pyłów do atmosfery podczas próbnego przetopu w laboratoryjnym piecu hutniczym

Obecność niektórych metali (Cr, Mn, Cu, Zn) w brykietach wprowadzanych do kąpieli metalowej może mieć pewne znaczenie technologiczne, co jest

kompensowane ich ilościowym udziałem w stosunku do masy wytopu. Na przykład masa brykietów wprowadzanych do pieca o pojemności 100 ton może wynosić 100 kg.

Metale o wysokiej prężności parowania rzędu 104 – 107 Pa (Pb, Zn, Cd, Al) mogą być wyniesione w postaci pyłów z gazami odlotowymi, stanowiąc składnik niepożądany ze względów ekologicznych. Przeprowadzona analiza składu chemicznego brykietów nie wykazała obecności ołowiu i kadmu. Zawartość cynku (0,09%) pozostaje na poziomie ilości wprowadzanej w złomie jako składnika wsadu w elektrostalowni. Nie powoduje to zakłóceń pracy pieca jak również zwiększenia emisji cynku do atmosfery podczas wytapiania.

Analiza chemiczna kąpieli metalowej po wytopie (tab. 5.15) wskazuje, że Al i Mn przechodzą częściowo do fazy metalicznej. Pozostała część przechodzi do fazy żużlowej bądź jest usuwana w postaci pyłu. Zawartość chromu w kąpieli jest znacznie mniejsza niż wprowadzona w brykietach. Pozostała część przechodzi do fazy żużlowej.

Przy założeniu, że wsad pieca składać się będzie w całości z brykietów zaś metale takie jak aluminium i cynk będą usuwane z kąpieli w postaci pyłu, to ich stężenie pozostaje na poziomie najmniejszym z możliwych do uzyskania w praktyce. Wprowadzenie do procesu wytapiania stali brykietów nie spowoduje więc zwiększonej emisji metali uciążliwych ekologicznie.

Obecność zanieczyszczeń olejowych (ok. 2%) oraz melasy wprowadzonej jako lepiszcze nie posiada praktycznie żadnego wpływu na emisję ciężkich węglowodorów z gazem odlotowym z pieca. Obecne w brykietach węglowodory ulegają rozkładowi w procesie wytapiania stali.

Analiza procesu pirolizy brykietów przeprowadzona w warunkach zbliżonych do panujących podczas wytapiania stali w piecu łukowym wskazuje, że podczas nagrzewania brykietów, przy temperaturze 300–800 °C, następuje wydzielenie węglowodorów lekkich ulegających spaleniu na powierzchni brykietów. Zjawisko takie występuje w okresie 0,5–2,5 minuty od początku procesu nagrzewania. W zakresie temperatur 600–900 °C następuje wydzielanie niewielkich ilości substancji smolistych (dym i sadza). Obserwowane zjawiska są wynikiem rozkładu obecnych w brykietach węglowodorów na związki proste, a w granicznych przypadkach na węgiel i wodór. Ogólna emisja węglowodorów wynosi ok. 0,55 dcm^3/kg brykietów. Brak jest w wydzielanych gazach węglowodorów ciężkich pomimo ich obecności w brykietach wyjściowych.

Należy zaznaczyć, że węglowodory wprowadzone w brykietach do wsadu pieca łukowego ulegną rozkładowi na węglowodory proste lub węgiel i wodór, które z kolei ulegną spaleniu podczas wytapiania [5]. Węglowodory lekkie obecne w brykietach nie mają wpływu zarówno na proces wytopu stali, jak i ich emisję do atmosfery.

Stwierdzona w odpadach obecność węgla w ilości ok. 3,3% nie stanowi problemu technologicznego i ekologicznego. Węgiel obecny w brykietach może zostać częściowo zużyty do nawęglania wytapianej stali lub zostać wypalony i usunięty z procesu w postaci tlenku węgla. Wykazano, że tworzenie CO z węgla w piecu łukowym zachodzi już od temperatury 550 °C, a więc w temperaturach dużo niższych niż temperatura topienia stali. Oszacowana ilość tworzącego się tlenku węgla w procesie produkcji stali niskostopowych wynosi ok. 3 m^3/tonę stali, co odpowiada ok. 3 dcm^3/kg. Określona podczas badań pirolitycznego rozkładu brykietów w obecności powietrza maksymalna emisja tlenku węgla wynosi ok. 1,1 dcm^3/kg. Nawet przy zastosowaniu tylko brykietów jako wsadu jest to wartość dużo mniejsza od emisji standardowej. Stąd zastąpienie odpadowymi brykietami części wsadu tradycyjnego nie zwiększy emisji tlenku węgla do atmosfery.

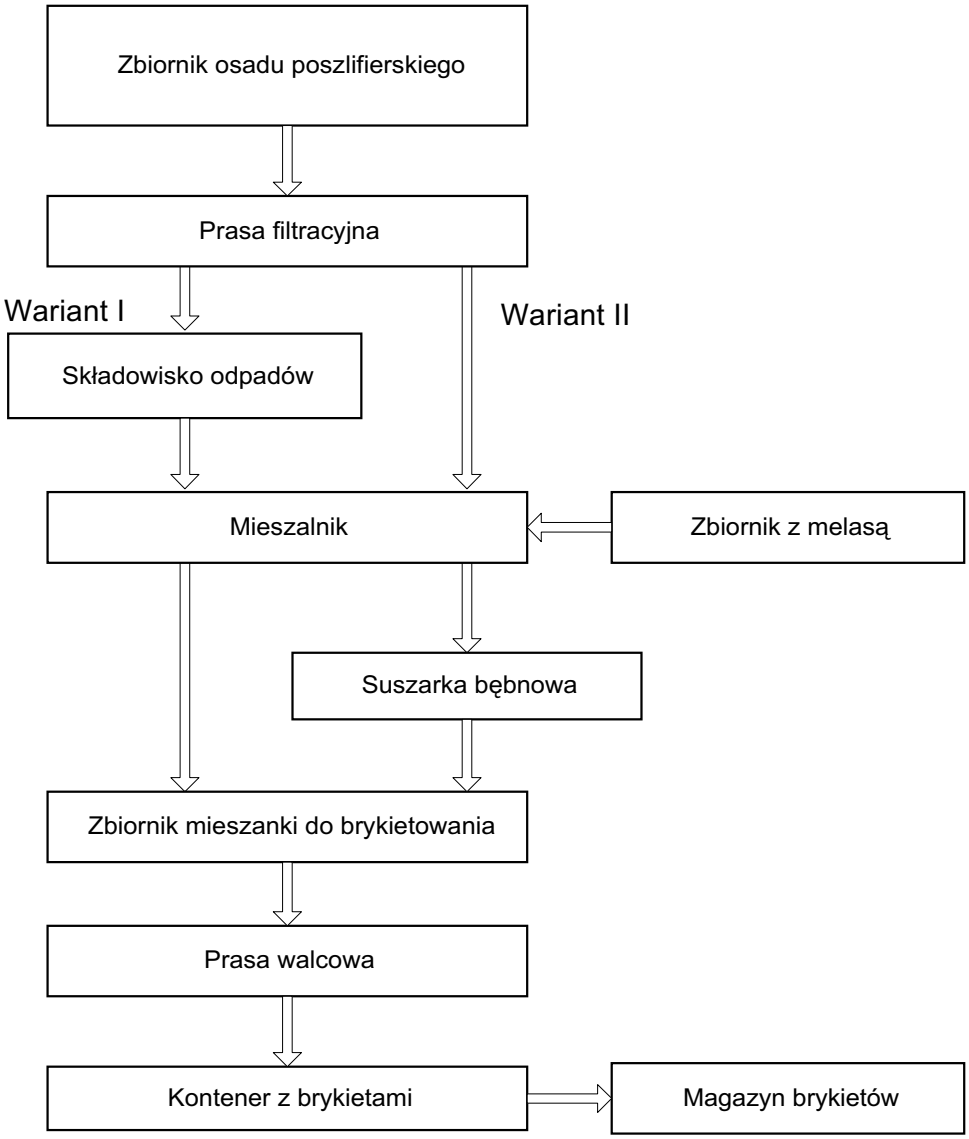
Ilość pyłu wytworzonego w wyniku zastąpienia części wsadu tradycyjnego brykietami pozostanie na stałym poziomie lub zostanie zmniejszona. Analiza chemiczna brykietów wykazuje, że w ich składzie jest niewielka ilość pierwiastków pyłotwórczych innych niż żelazo, do których należy Ca oraz Si. Pierwiastki te w czasie trwania procesu przechodzą do żużla w postaci tlenków lub krzemianów. Pierwiastkiem, który może ulegać utlenieniu i przechodzić do fazy gazowej w postaci pyłu jest żelazo. Utlenianie żelaza podczas wytopu stali zachodzi jednakże niezależnie od jego pochodzenia, stąd zastąpienie brykietami np. części złomu jest w pełni uzasadnione. Powstający tlenek żelaza w ok. 90% przechodzi do fazy żużlowej, a w ok. 10% jest usuwany w postaci pyłu.

5.11. Opracowanie koncepcji przemysłowej linii technologicznej do brykietowania drobnoziarnistych materiałów odpadowych w prasach walcowych

Wyniki badań eksperymentalnych stanowiły podstawę do opracowania dwóch wariantów linii technologicznej do brykietowania odpadów poszlifierskich. W zależności od przyjętej metody dosuszania odpadów zaproponowano następujące warianty:

I – z dosuszaniem naturalnym,
II – z dosuszaniem w suszarce bębnowej.

Schemat blokowy obu wariantów linii technologicznej pokazano na rysunku 5.30. W badaniach własnych stwierdzono, że rodzaj zastosowanych urządzeń do brykietowania odpadów nie ma większego znaczenia. Istotny jest natomiast dobór odpowiedniego układu formującego umożliwiającego osiągnięcie wymaganego stopnia zagęszczenia, przy czym układ ten powinien



Rys. 5.30. Schemat blokowy wariantów linii technologicznej brykietowania łożyskowych odpadów poszlifierskich

umożliwić uzyskanie brykietów pozbawionych ostrych krawędzi. W obu wariantach linii technologicznej zaproponowano wykorzystanie prasy walcowej wyposażonej w układ formujący pozwalający uzyskać brykiety bez płaszczyzny podziału w kształcie siodła. Próby hutnicze potwierdziły ich przydatność metalurgiczną.

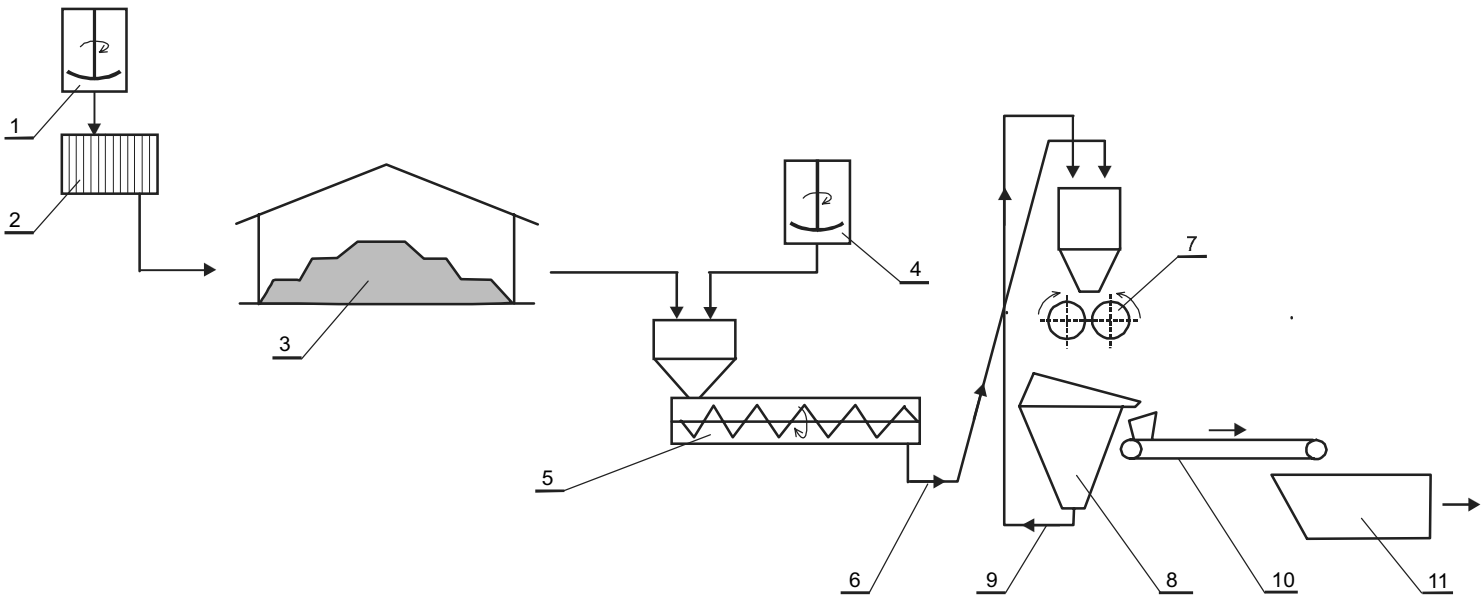
Na rysunku 5.31 pokazano schemat linii technologicznej z dosuszaniem naturalnym odpadów drobnoziarnistych. Opracowano go w aspekcie możliwości zastosowania w Fabryce Łożysk Tocznych w Kraśniku do zagęszczania i scalania łożyskowych szlamów poszlifierskich. Po wstępnym odwodnieniu szlamów w prasie filtracyjnej (2) transportowane są one na zadaszone składowisko (3) z przegarniaczem rewersyjnym. Po podsuszeniu w warunkach naturalnych odpady transportuje się do kosza zasypowego mieszarki ślimakowej (5), do której podaje się także melasę ze zbiornika (4). Następnie, powstała mieszanka transportowana jest przenośnikiem kubełkowym (6) do prasy walcowej (7). Zbrykietowane odpady po odsianiu na ruszcie separatora (8) transportowane są przenośnikiem taśmowym (10) do kontenera na brykiety (11). Podziarno oddzielone od brykietów zawracane jest przenośnikiem kubełkowym (9) do kosza zasypowego brykieciarki walcowej.

W przedstawionej linii technologicznej proponuje się zastosowanie następujących urządzeń:

1. Brykieciarka walcowa PW 500 wyposażona w zasilacz grawitacyjny. Średnica walców wynosi 500 mm. Ilość wgłębień formujących w jednym rzędzie wynosi od 40 do 50. Moc silnika napędowego wynosi 55 kW. Wydajność objętościowa wynosi 3,0 m^3/h.
2. Prasa filtracyjna PFK-630 zaopatrzona w 30 płyt filtracyjnych. Pojemność prasy wynosi 0,2 m^3. Ilość osadu po filtracji wynosi 0,6 m^3. Wydajność prasy wynosi 1,8 m^3/h.
3. Mieszalnik odpadów MD-3 zaopatrzony w dwuślimakowy zespół mieszający. Wydajność wynosi 2 m^3/h. Moc silnika wynosi 2 kW.
4. Podajnik śrubowy PS-1. Moc silnika wynosi 1,5 kW.
5. Wózek samowyładowczy Owc-30 stosowany do odbierania odpadów i transportu. Pojemność wózka wynosi 0,5 m^3.
6. Kontener Ojs-76 stosowany do składowania i sezonowania brykietów.

Zastosowanie linii technologicznej z dosuszaniem odpadowej mieszanki na składowisku w warunkach naturalnych powinno umożliwić zmniejszenie kosztów produkcji brykietów. Wiąże się to jednak z koniecznością zapewnienia odpowiedniego pola składowania odpadów. Wymagane miejsce składowania powinno być zadaszone i wyposażone w przegarniacz rewersyjny. W przypadku przeróbki samych odpadów poszlifierskich z fabryki w Kraśniku, pomieszczenie to powinno mieć wymiary 40 × 25 m. Z badań eksperymentalnych wynika, że czas składowania pod zadaszeniem powinien wynosić od 2 do 4 tygodni.

Zauważono, że dosuszanie odpadów łożyskowych w warunkach naturalnych sprzyja ich samoistnemu scalaniu. Wskazane jest zatem rozdrabnianie grudek przed dodaniem melasy.



Rys. 5.31. Koncepcja linii technologicznej do brykietowania odpadów poszlifierskich z zastosowaniem suszenia w warunkach naturalnych:

1 – zbiornik osadu poszlifierskiego, 2 – prasa filtracyjna, 3 – składowisko odpadów z przegarniaczem rewersyjnym, 4 – zbiomik melasy, 5 – mieszalnik ślimakowy, 6 – przenośnik kubełkowy, 7 – brykieciarka walcowa, 8 – separator, 9 – przenośnik kubełkowy do zawrotu odsiewu, 10 – przenośnik taśmowy do odbioru brykietów, 11 – kontener na brykiety

Ze względu na dużą wydajność brykieciarki odpady mogą być przerabiane okresowo. Szacuje się, że proponowany wariant linii technologicznej może przetworzyć 1600 ton odpadów poszlifierskich rocznie pracując przez ok. jeden tydzień w ciągu każdego miesiąca.

W przypadku braku miejsca na składowanie odpadów można zainstalować suszarkę bębnową do ich dosuszania według koncepcji przedstawionej na rysunku 1.9 (rozdz. 1). Zastosowanie dosuszania odpadów w suszarce bębnowej spowoduje wzrost kosztów eksploatacji linii technologicznej. Ponadto okresowy charakter pracy suszarki może być mało efektywny. W takiej sytuacji powinno się zapewnić możliwość ciągłej pracy linii przetwarzając odpady pobrane również od innych producentów.

5.12. Piśmiennictwo

1. Drzymała Z., Hryniewicz M. 1999: O doskonaleniu konstrukcji układu zagęszczania pras walcowych do brykietowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych. *Przegląd Mechaniczny*, 14: 8–13.
2. Drzymała Z., Hryniewicz M., Kosturkiewicz B. 1998: Zagadnienie doboru konfiguracji układu zagęszczania pras walcowych do brykietowania drobnoziarnistych odpadów przemysłowych. *Przegląd Mechaniczny*, 13: 5–10.
3. Hryniewicz M. 1997: Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji. *Zeszyty Naukowe AGH – Rozprawy i Monografie*, 58, Kraków.
4. Hryniewicz M., Borowski G., Kuczmaszewski J. 2003: Badania nad sposobem utylizacji odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego. Materiały VII Międzynarodowej Konferencji „Recyklace Odpadu", Ostrawa: 95–102.
5. Hryniewicz M., Karbowniczek M. i in. 2004: Sprawozdanie z pracy badawczej „Część I – Badanie możliwości zagęszczania i scalania drobnoziarnistych zanieczyszczonych odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego dla potrzeb utylizacji. Część II – Badania modelowe brykietów z odpadów łożyskowych z punktu widzenia ich przydatności w piecach elektrycznych". AGH w Krakowie.
6. Kapias P., Płonka J. 1992: Próby przemysłowe brykietowania koncentratów miedzi przy użyciu nowego środka wiążącego na bazie skrobi wyprodukowanego w skali przemysłowej w Z.Ch. Złotniki. Instytut Metali Nieżelaznych, Gliwice.
7. Płonka J., Gębczyk W., Szuba S., 1990: Opracowanie technologii brykietowania pyłów stalowniczych pochodzących z elektrycznych pieców łukowych. Cz. I. Przeprowadzenie wstępnych prób doboru lepiszcza do brykietowania pyłów stalowniczych z elektrycznych pieców łukowych. Instytut Metali Nieżelaznych, Gliwice.
8. Strona internetowa Zakładów Magnezytowych „Ropczyce" S.A. (www.ropczyce.com.pl).

6. ASPEKTY EKONOMICZNE I EKOLOGICZNE UTYLIZACJI BRYKIETÓW

Proces przeróbki drobnoziarnistych odpadów poszlifierskich do postaci brykietów, a następnie utylizacja tych brykietów w hutnictwie, przynosi wymierne korzyści ekologiczne i ekonomiczne. Najważniejsze korzyści ekonomiczne obejmują [3, 11]:

- zmniejszenie zużycia materiałów oraz kosztów produkcji,
- pomniejszenie lub wyeliminowanie koszów transportu odpadów na wysypisko,
- obniżenie kapitałochłonności i energochłonności pozyskiwania i przetwórstwa surowców,
- powiększenie bazy surowcowej gospodarki krajowej dzięki pełnemu wykorzystaniu surowców i materiałów.

Korzyści ekologiczne natomiast, wyrażają się poprzez spełnienie przez producentów wymogów nie zanieczyszczania środowiska naturalnego. Stosowane urządzenia i technologie powinny zapewnić neutralizację lub redukcję substancji szkodliwych i niebezpiecznych dla środowiska. Do roku 2000 wiele krajowych przedsiębiorstw produkujących odpady drobnoziarniste nie stosowało utylizacji, a jedynie składowanie odpadów w wydzielonych częściach komunalnych wysypisk śmieci. Dopiero w 2001 r. po wejściu nowej ustawy „Prawo ochrony środowiska" zaczęto powszechnie utylizować odpady i ograniczać ich wywóz na wysypiska. Na skutek ograniczenia lub wyeliminowania składowania odpadów przemysłowych następuje przedłużenie okresu eksploatacji wysypisk odpadów komunalnych.

6.1. Podstawowe zasady obowiązujące w polskim prawie ochrony środowiska

W strukturze prawa ochrony środowiska w Polsce podstawowe przepisy prawne wytyczają:

- Konstytucja Rzeczpospolitej Polskiej z 1997 r., zwłaszcza art. 5 i art. 74 [4];
- ustawa z 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (POŚ) [5].

Podstawowe zasady obowiązujące w polskim prawie ochrony środowiska to [10]:

1. Zasada zrównoważonego rozwoju – jest zarazem jedną z głównych konstytucyjnych podstaw ustroju państwa polskiego (art. 5 Konstytucji RP). Na nowo została zdefiniowana w art. 3 pkt 50 POŚ.

2. Zasada powszechnego korzystania ze środowiska wyrażona w art. 4 POŚ. Ustawa wprowadza trzy pojęcia:
   – powszechnego korzystania ze środowiska (art. 4 ust. 1),
   – zwykłego korzystania ze środowiska (art. 4 ust. 3),
   – korzystania, które może się odbywać na podstawie pozwolenia (art. 4 ust. 2).

   Kontrola nad przestrzeganiem wymagań ochrony środowiska w trakcie korzystania z niego generalnie należy do zadań Inspekcji Ochrony Środowiska.
3. Zasada kompleksowości ochrony środowiska (art. 5 POŚ); zgodnie z nią ochrona, jednego lub wielu elementów przyrodniczych, powinna być realizowana z uwzględnieniem ochrony pozostałych elementów (dotyczy ona wszystkich trzech rodzajów korzystania ze środowiska, określonych w art. 4 POŚ).
4. Zasada prewencji – przeciwdziałanie i zapobieganie zanieczyszczeniu (art. 6 ust. 1 POŚ); każdy kto podejmuje działalność mogącą negatywnie oddziaływać na środowisko, jest obowiązany do zapobiegania temu oddziaływaniu (por. art. 7 ust. 2 POŚ). Wprowadzenie do polskiego ustawodawstwa zasady prewencji pociągnęło równocześnie wprowadzenie koncepcji BAT (Best Accessible Technologies), czyli koncepcji „najlepszych dostępnych technik" (por. art. 3 pkt. 10 POŚ).
5. Zasada przezorności (art. 6 ust. 2 POŚ); zgodnie z nią ten, kto podejmuje działalność, której negatywne oddziaływanie na środowisko nie jest w pełni rozpoznane, jest obowiązany – kierując się przezornością, podjąć wszelkie możliwe środki zapobiegawcze.
6. Zasada materialnej odpowiedzialności sprawcy zanieczyszczenia środowiska tzw. „zanieczyszczający płaci" (art. 7 ust. 1 POŚ); rozwinięcie zasady odpowiedzialności za szkody w środowisku zawartej w art. 86 Konstytucji RP. Należy podkreślić uniwersalny (międzynarodowy) charakter zasad ujętych w art. 5–7 POŚ.
7. Zasada integracji ochrony środowiska – nadrzędności wymagań (art. 8 POŚ); mówi, iż wszelkie dokumenty, a więc polityki, strategie, plany lub programy dotyczące poszczególnych działów gospodarki (przemysłu, energetyki, transportu, itp.) jak też jej sektorów związanych z gospodarką przestrzenną, leśnictwem, rolnictwem, rybołówstwem, turystyką, powinny uwzględniać w swej treści te zasady ochrony środowiska, które są sformułowane w art. 4–12 POŚ. Z powyższym wiąże się zasada planowości, która w zakresie gospodarki przestrzennej oznacza obowiązek uwzględniania wymagań ochrony środowiska, wynikających z materialnego prawa administracyjnego w ustaleniach, w szczególności miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego. Nadrzędną wobec tej zasady jest zasada zrównoważonego rozwoju.

8. Zasada dostępu do informacji o środowisku (art. 9 POŚ); według niej każdy ma prawo do informacji o środowisku i jego ochronie na warunkach określonych ustawą; nawiązuje do art. 61 ust. 1 Konstytucji RP, który mówi o prawie obywatela do informacji. Obejmuje również dziedzinę ochrony środowiska jako część władzy publicznej. Prawo to gwarantuje Konwencja z Aarhus z 1998 r..
9. Zasada partycypacji publicznej w rozwiązywaniu problemów środowiskowych (art. 10 POŚ); nawiązuje do art. 74 ust. 4 i ust. 3 Konstytucji RP. Reguluje ona warunki udziału obywateli oraz innych podmiotów np. organizacji ekologicznych w procedurach administracyjnych, których wyniki będą rzutowały na stan środowiska. Mogą oni być dopuszczeni do postępowań dotyczących, m.in. opracowywania polityk, strategii, planów i programów rozwoju i restrukturalizacji, studium i planu zagospodarowania przestrzennego; decyzji administracyjnych, przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko; wydawania (zmiany) zintegrowanych pozwoleń ekologicznych; sporządzania zewnętrznego planu operacyjno-ratowniczego. Zasada nie ma charakteru powszechnego od strony przedmiotowej, a zakres uprawnień precyzowany jest przepisami szczegółowymi.
10. Zasada eliminacji – nieważność decyzji wydanej z naruszeniem przepisów dotyczących ochrony środowiska (art. 11 POŚ); istotne jest, iż nieważność z mocy prawa według art. 11 dotyczy wyłącznie decyzji administracyjnych, a nie aktów stanowiących ich podstawę prawną i czynności podejmowanych dla ich wykonania.
11. Zasada ujednolicania względnie porównywalności wyników badań i pomiarów (art. 12 POŚ). Przepis art.12 ust. 1 wprowadza obowiązek stosowania metodyk referencyjnych w przewidziany ustawą sposób (por. np. art. 90 ust. 3 POŚ – ustalenie metodyki referencyjnej dla potrzeb badania stanu jakości powietrza). Przepis art. 12 ust. 2 określa warunki zwolnienia od obowiązku stosowania ustalonej metodyki referencyjnej z koniecznością udowodnienia, że przyjęta metodyka daje równoważne wyniki.

Akty prawne Wspólnoty Europejskiej dotyczące środowiska stały się punktem odniesienia dla wielu państw, a także praktycznym modelem współpracy ponadnarodowej. W ciągu minionych 25 lat Wspólnota Europejska przyjęła wiele aktów prawnych ukierunkowanych na przywrócenie właściwego stanu środowiska i jego ochronę, najczęściej w postaci dyrektyw, w tym kilkanaście dotyczących odpadów. Podstawowe zasady strategii Wspólnoty w dziedzinie gospodarowania odpadami to [10]:

- zapobieganie powstawaniu nadmiernych ilości odpadów,
- odzysk i powtórne wykorzystanie odpadów,

- optymalne ostateczne usuwanie,
- bezpieczny transport odpadów,
- działania naprawcze w środowisku.

Obowiązujące obecnie przepisy prawne nakazują obowiązek utylizacji tych odpadów przez ich wytwórcę [6, 7]. Podstawową zasadą prawa ochrony środowiska Unii Europejskiej jest – oprócz przeciwdziałania powstawaniu odpadów – reguła, zgodnie z którą koszty utylizacji odpadów przede wszystkim ponosi ich wytwórca.

6.2. Podstawy teoretyczne oceny efektywności finansowej inwestycji

Oszacowanie korzyści ekonomicznych wprowadzenia przedsięwzięcia mającego na celu przetwórstwo odpadów i produkcję brykietów celem ich utylizacji wymaga przeprowadzenia oceny efektywności finansowej takiej inwestycji. Ocenę efektywności finansowej przedsięwzięć inwestycyjnych dokonuje się wykorzystując różne metody obliczeń, które można podzielić na proste oraz dyskontowe [8, 12]. Do prostych metod oceny efektywności zalicza się m.in.:

- okres zwrotu nakładów inwestycyjnych,
- księgową stopę zwrotu.
- prostą stopę zwrotu.

Do metod najbardziej znanych i stosowanych należy okres zwrotu nakładów inwestycyjnych (*payback*). Okres zwrotu nakładów inwestycyjnych dla danego projektu wylicza się przez wyznaczenie liczby lat, jaka upłynie od momentu, w którym skumulowane, przewidywane przepływy pieniężne zrównają się z początkowymi nakładami. Wielkość tę w ocenie efektywności przedsięwzięcia inwestycyjnego porównuje się z „granicznym okresem zwrotu". Jego wielkość można określić w sposób szacunkowy lub też – znając przewidywany rozkład przepływów – na poziomie zbliżonym do maksymalizacji wartości zaktualizowanej netto. Metoda okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych jest prosta i łatwa do zastosowania. Pozwala ona na określenie jak najszybszego odzyskania nakładów poniesionych w okresie realizacji inwestycji. Kryterium to nadaje więc dużą wagę przepływom pieniężnym przed zwrotem nakładów początkowych. Poza obszarem badań pozostają przepływy pieniężne po dacie zwrotu. Zastosowanie tej metody wymaga określenia granicznego okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych. Jego wielkość powinna być zróżnicowana, m.in. w zależności od wartości zaktualizowanej netto i długości życia projektu. Wadą tej metody jest pomijanie przy wyborze określonego projektu inwestycyjnego faktu

zmiennej wartości pieniądza w ujęciu nominalnym oraz nominalna wysokość preliminowanych nadwyżek finansowych, które będą osiągane w okresie obliczeniowym. Metoda okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych informuje przede wszystkim o płynności nakładów. Nie jest natomiast miernikiem rentowności przedsięwzięcia, stąd spełnia jedynie rolę narzędzia pomocniczego oceny przedsięwzięć rozwojowych.

Do prostych metod oceny efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych należy również przeciętna księgowa stopa zwrotu [12]. Otrzymuje się ją w wyniku podzielenia przeciętnych przewidywanych zysków z projektu, po uwzględnieniu amortyzacji i podatków, przez przeciętną księgową wartość inwestycji. Tak obliczona wartość jest porównywana z księgową stopą zwrotu ustaloną dla całej firmy lub dla danej branży przemysłowej. Wskaźnik przeciętnej księgowej stopy zwrotu (*average return on book value*) charakteryzuje się kilkoma poważnymi mankamentami, a mianowicie:

- przedmiotem rozważań jest tylko przeciętny zwrot z księgowej wartości inwestycji; nie jest więc brany pod uwagę fakt, że bliższe czasowo zwroty są bardziej wartościowe; tym samym księgowa stopa zwrotu nadaje zbyt dużą wagę przepływom odległym czasowo;
- nie opiera się ona na przepływach pieniężnych lecz na zysku netto;
- wybór bazy odniesienia ma charakter arbitralny np. bieżąca księgowa stopa zwrotu, co powoduje, że decyzje mogą być odnoszone do rentowności działalności już prowadzonej przez firmę.

Kolejna metoda, tj. prosta stopa zwrotu wykorzystuje w ocenie efektywności projektów inwestycyjnych szczególne postacie wskaźników rentowności. Wszystkie przedstawione wyżej metody obliczeń nie uwzględniają jednak kosztu pieniądza w czasie. Tego mankamentu nie posiadają metody dyskontowe, a mianowicie:

- wartość zaktualizowana netto (*net present value* – NPV),
- wewnętrzna stopa zwrotu (*internal rate of return* – IRR),
- zmodyfikowana wewnętrzna stopa zwrotu (*modify internal rate of return* – MIRR),
- wskaźnik efektywności (*profitability index* – PI).

W wymienionych metodach uwzględnia się czynnik czasu w rachunku poprzez wykorzystanie techniki dyskonta. Maksymalizacja wartości firmy uzależniona jest nie tylko od wielkości przewidywanych przepływów pieniężnych, ale także od rozłożenia nakładów i efektów w czasie. Technika dyskonta pozwala sprowadzić do porównywalności nakłady i efekty z całego okresu obliczeniowego, wyrażając je w wartości teraźniejszej, tj. zaktualizowanej w momencie przeprowadzania oceny.

Metody z tej grupy należą, do bardziej precyzyjnych. Przedmiotem oceny jest cały okres funkcjonowania przedsięwzięcia, czyli okres realizacji i pełny okres eksploatacji inwestycji. Szacunek elementów obliczeniowych poprzedzony jest wnikliwymi badaniami dotyczącymi zarówno samego projektu, jego charakteru, jak i otoczenia, w którym będzie on funkcjonował. Szczegółowa analiza znacząco może wpłynąć na istotność uwzględnianych wielkości, zwiększając tym samym trafność dokonywanej prognozy i wyboru kierunków inwestowania.

Metoda wartości zaktualizowanej netto (NPV) opiera się na następujących ustaleniach [12]:

- pieniądz posiada większą wartość obecnie niż w przyszłości;
- wielkość ta zależy wyłącznie od przewidywanych w przyszłości przepływów pieniężnych oraz kosztu utraconych korzyści;
- przepływy środków pieniężnych, a stąd i dywidendy, determinują bogactwo akcjonariuszy;
- wartość NPV różnych projektów jest mierzona wartością bieżącą (teraźniejszą), a więc można je do siebie dodawać.

Przedstawiona właściwość (addytywność) NPV daje tej właśnie metodzie wyższość nad pozostałymi metodami, które tej cechy nie posiadają. Za korzystne uważa się wszystkie projekty, których wartość zaktualizowana netto przyjmuje wielkości większe od zera, a w skrajnych przypadkach równe zeru. Oznacza to wówczas, że stopa rentowności badanego przedsięwzięcia rozwojowego jest wyższa od stopy granicznej, określanej przez przyjętą do rachunku stopę dyskontową. Warianty, w których NPV posiada wartości ujemne, nie zapewniają pełnego pokrycia przewidywanych nakładów inwestycyjnych, w związku z czym powinny zostać odrzucone.

Stopa dyskontowa wyraża minimalną stopę zyskowności kapitału zaangażowanego w inwestycje – koszty utraconych korzyści. Im jest ona większa tym bieżąca wartość nominalna tego samego przepływu jest mniejsza. W wielkości stopy dyskontowej powinno się uwzględniać co najmniej koszt oferowanych na rynku kapitałowym kredytów czy pożyczek, powiększony o odpowiednią marżę ryzyka łączącego się z danym przedsięwzięciem.

Zaktualizowana wartość netto posiada też wady – konieczność obliczania kosztu kapitału. W praktyce może być niezmiernie trudne natychmiastowe jego obliczenie, a zwłaszcza prognozowanie. Dodatnia wartość zaktualizowana netto świadczy o opłacalności realizacji przedsięwzięcia inwestycyjnego. Nie może być jednak wystarczającą podstawą do wyboru wariantu najbardziej efektywnego. Jako wielkość absolutna wyraża rozmiary nadwyżki a nie poziom rentowności alternatywnych propozycji zaangażowania kapitału.

Najpopularniejszą metodą stosowaną przy ocenie finansowej przedsięwzięć inwestycyjnych jest metoda wewnętrznej stopy zwrotu (IRR) – definiowana jako

stopa dyskontowa, przy której NPV równa się zero. Również ta metoda nie jest pozbawiona wad, a mianowicie:

- nie wszystkie przepływy pieniężne mają NPV malejące wraz ze wzrostem stopy dyskontowej, co utrudnia ocenę atrakcyjności projektów,
- może występować więcej niż jedna wewnętrzna stopa dyskontowa,
- przy projektach wzajemnie wykluczających się reguła IRR może być myląca, wobec czego proponuje się obliczenie wewnętrznej stopy zwrotu z przepływów przyrostowych, z tym jednak, że zmiana znaków przepływów pieniężnych w poszczególnych okresach powoduje występowanie kilku IRR,
- zasada IRR nie identyfikuje pakietu projektów inwestycyjnych, który odpowiada ograniczeniom kapitałowym i ma większą zaktualizowaną wartość netto,
- trudność interpretacji ekonomicznej w przypadku występowania różnych stóp procentowych w krótkim i długim okresie.

Powyższe względy przemawiają za wykorzystaniem w określonych przypadkach także i innych metod oceny efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych. Do takich, oprócz już przedstawionych, zaliczyć można wskaźnik efektywności (*profitability index*) [8].

Wskaźnik ten stanowi relację wartości zaktualizowanej przewidywanych przyszłych przepływów pieniężnych (PV) i nakładów początkowych (I). Stosowanie tego kryterium zaleca przyjęcie wszystkich projektów, które osiągają poziom wskaźnika większy od jedności, co oznacza, że wartość PV jest większa od początkowych nakładów inwestycyjnych i dlatego projekt musi mieć dodatnią wartość NPV. Stąd też wskaźnik efektywności prowadzi dokładnie do takich samych rezultatów jak NPV. Niemniej, podobnie jak przy IRR, wskaźnik efektywności może być mylący, gdy zachodzi konieczność wyboru spośród dwóch wzajemnie wykluczających się projektów.

Charakterystyka przedstawionych metod obliczeń w celu oceny efektywności inwestycyjnej wykazuje, że wszystkie z nich oprócz niewątpliwych zalet posiadają również wady. Poprawny wybór projektu oraz ograniczenie ryzyka inwestowania możliwe jest przez równoczesne stosowanie kilku metod jednocześnie.

Ryzyko inwestycyjne wpływa na ostateczny rachunek efektywności i wybór wariantu inwestycyjnego. Do czynników wpływających na jego poziom należą, m.in.: stopa procentowa, kursy walut, popyt, podaż, inflacja, ceny, polityka podatkowa państwa. Poziom niepewności wzrasta w miarę jak wydłuża się czas realizacji i eksploatacji inwestycji.

Dla określenia poziomu ryzyka wykorzystuje się rachunek prawdopodobieństwa. W każdym roku szacuje się kilka możliwych wartości strumieni pieniężnych netto i przypisuje im określone prawdopodobieństwo wystąpienia.

Następnie określa się wartość oczekiwaną strumieni pieniężnych oraz odchylenie standardowe [8].

Odchylenie standardowe jest miarą rozproszenia przewidywanych zaktualizowanych wartości strumieni pieniężnych od wartości oczekiwanej. Informuje ono o ile średnio wartość NPV ocenianego projektu może odchylać się od wartości oczekiwanej (ENPV). Ryzyko związane z analizowanym projektem inwestycyjnym jest tym wyższe im wyższa jest wartość odchylenia standardowego.

Odchylenie standardowe jest miarą bezwzględnej wartości rozproszenia, dlatego w praktyce wykorzystuje się współczynnik zmienności. Współczynnik zmienności określa ryzyko przypadające na jednostkę wartości oczekiwanej NPV. Im niższa jest wartość współczynnika zmienności, tym ryzyko jest mniejsze.

Do oceny ryzyka inwestycyjnego wykorzystać można również analizę progu rentowności oraz analizę wrażliwości wskaźników oceny na zmianę przewidywanych warunków realizacji i eksploatacji inwestycji. Próg rentowności, nazywany inaczej krytycznym poziomem sprzedaży, określa wielkość przychodów ze sprzedaży koniecznych do pełnego sfinansowania kosztów związanych z realizacją i eksploatacja planowanego przedsięwzięcia inwestycyjnego.

Poziom progu rentowności zależy od takich czynników jak [12]:

1. Wysokość cen sprzedaży produktów i usług. Im wyższe ceny tym próg rentowności jest niższy i odwrotnie. Spadek lub wzrost jednostkowych cen sprzedaży powoduje zmianę progu rentowności, powodując jego podwyższenie lub obniżenie.
2. Struktura asortymentowa sprzedaży. Im wyższy udział w przychodzie ze sprzedaży mają produkty i usługi o wyższej marży brutto tym niższy próg rentowności i odwrotnie. Zmiana struktury asortymentowej produkcji i sprzedaży na korzyść asortymentów bardziej rentownych powoduje obniżenie progu rentowności. Z kolei zwiększenie udziału produktów i usług o niższej rentowności wpływa na wzrost progu rentowności.
3. Poziom kosztów stałych. Przedsięwzięcia o wysokich kosztach stałych wymagają większej sprzedaży na ich pokrycie, niż przedsięwzięcia o niskim poziomie tych kosztów. Trudniej w tych projektach uzyskać określoną masę zysku. Równocześnie przedsięwzięcia te są bardziej wrażliwe na spadek sprzedaży.
4. Poziom kosztów zmiennych. Przy danym poziomie ceny i kosztów stałych próg rentowności zależy od jednostkowych kosztów zmiennych. Koszty te kształtowane są przez stosowane technologie wytwarzania, które determinują wielkość zużycia bezpośrednich czynników produkcji. Przedsięwzięcia, w których przewiduje się stosowanie technologii oszczędnych, charakteryzują się niższym progiem rentowności, co czyni je mniej wrażliwymi na spadek ceny lub wielkości sprzedaży.

Poziom ryzyka związanego z realizacją danego przedsięwzięcia inwestycyjnego określa m.in. relacja między przewidywanymi przychodami ze sprzedaży a progiem rentowności. O tej relacji informuje wskaźnik progu rentowności (WPR). Im niższy poziom wskaźnika tym mniejsze ryzyko (zagrożenie) związane ze spadkiem wielkości sprzedaży w analizowanym projekcie inwestycyjnym. Większy jest bowiem margines bezpieczeństwa finansowego. Wskaźnik marginesu bezpieczeństwa informuje o tym, o ile procent mogą spaść przychody ze sprzedaży netto z tytułu spadku ilości sprzedaży, by przedsięwzięcie nie przyniosło straty.

Jednakże próg rentowności zmienia się nie tylko pod wpływem wielkości sprzedaży, lecz również przy zmianie cen i kosztów. Dlatego konieczne jest również określenie marginesów bezpieczeństwa zarówno ze względu na ceny jak i na koszty. Strefę bezpieczeństwa przedsięwzięć inwestycyjnych stanowi przewidywany zysk operacyjny na sprzedaży.

Margines bezpieczeństwa ze względu na ceny informuje o tym, o ile procent średnio mogą obniżyć się ceny sprzedaży, przy przewidywanej wielkości sprzedaży i przewidywanych kosztach, by inwestycja nie przyniosła straty. W przypadku marginesu bezpieczeństwa ze względu na koszty zakłada się niezmienność wielkości sprzedaży i cen. Określa się tym samym procentowy, możliwy wzrost kosztów. Im wyższe są marginesy bezpieczeństwa tym mniejsze ryzyko towarzyszy analizowanej inwestycji.

Analiza wrażliwości polega na badaniu wpływu zmiany wartości czynników efektywnościowych inwestycji takich jak: wielkość sprzedaży, ceny, koszty, nakłady inwestycyjne, stopy procentowe, itp. na wartość wskaźników oceny (okres zwrotu, NPV, IRR, PI). W tym celu opracowuje się kilka wariantów przyszłych strumieni pieniężnych różniących się wartością wymienionych wyżej czynników i analizuje zmiany wartości wskaźników oceny. Im mniejszym zmianom czynników efektywnościowych towarzyszą większe zmiany w wartości wskaźników oceny, tym ryzyko związane z analizowaną inwestycją jest wyższe.

6.3. Przykład analizy finansowej utylizacji brykietów

Inwestycja dotyczy wykorzystania drobnoziarnistych (poszlifierskich) odpadów powstających w procesie technologicznym wytwarzania łożysk tocznych na terenie największego producenta tych wyrobów w naszym kraju [1]. Odpady te posiadają bardzo wysoką zawartość żelaza i mogą być wykorzystane jako dodatek surowcowy w procesie wytopu stali. Opracowano technologię zagęszczania i scalania odpadów w formie brykietów, kształtowanych przy pomocy maszyn prasujących oraz zapewniono odpowiednią wytrzymałość i jakość powstałych wyrobów [3].

W celu obliczenia kosztów i przychodów oraz wskaźników efektywności ekonomicznej technologii brykietowania odpadów przyjęto następujące założenia:

- przed wdrożeniem inwestycji odpady składowano na wysypisku śmieci;
- do odwodnienia odpadów zastosowana zostanie płytowa prasa filtracyjną, natomiast do brykietowania – prasa walcowa typu LPW 450;
- zakup powyższych urządzeń sfinalizowany zostanie ze środków własnych przedsiębiorstwa, a nie z kredytu;
- końcowe dosuszanie odpadów prowadzone będzie w warunkach naturalnych na zadaszonym poletku składowym,
- produkcja brykietów prowadzona będzie w istniejących na terenie przedsiębiorstwa budynkach,
- odbiorcą brykietów będzie huta posiadająca elektryczne piece łukowe do przetopu złomu.

Warunkiem hutniczego wykorzystania odpadów łożyskowych jako materiału do przetopu w elektrycznych piecach stalowniczych jest jego odpowiednie przygotowanie. Podstawową kwestią jest nadanie odpadowi postaci kawałkowej, np. poprzez brykietowanie. Brykiety powinny spełniać specyficzne wymogi hutnictwa takie jak [3]:

- wymiary brykietów powinny być dostosowane do wielkości kosza wsadowego,
- brykiety powinny posiadać odpowiednie właściwości mechaniczne,
- muszą one zachować te właściwości w okresie sezonowania,
- powinny cechować się łatwością magazynowania i transportu,
- powinny posiadać odpowiedni skład chemiczny,
- nie mogą zawierać siarki, metali ciężkich i ich związków,
- mogą zawierać tylko ściśle określoną zawartość pozostałych zanieczyszczeń.

Szacuje się, że spełniająca powyższe wymogi masa brykietów z łożyskowych odpadów poszlifierskich pochodzących ze wszystkich krajowych fabryk może wynosić około 2000 ton rocznie.

Koszty usuwania i składowania odpadów

Masa wytworzonych odpadów poszlifierskich w rozpatrywanym zakładzie produkcji kulek łożyskowych wynosi ok. 1680 Mg rocznie. Koszty usuwania i składowania odpadów na komunalnym wysypisku śmieci obejmowały [2]*:

1. Opłaty za umieszczenie odpadów na wysypisku i za składowanie – 8 600 zł
2. Koszty transportu odpadów z zakładu na wysypisko – 75 000 zł
3. Koszt obsługi związanej z gromadzeniem i załadunkiem odpadów – 70 200 zł

   Łącznie: – 153 800 zł

---

* Analiza dotyczy kosztów z roku 2001.

Uwzględniając koszty utylizacji odpadów powyższe koszty uległy zmniejszeniu po wprowadzeniu obowiązku tej utylizacji zamiast składowania.

Koszty eksploatacji urządzeń

W przypadku zastosowania brykietowania odpadów wystąpi konieczność zakupienia prasy walcowej oraz poniesienia kosztów jej eksploatacji. Masa odpadowa przeznaczona do brykietowania powinna cechować się niską wilgotnością. Występuje więc konieczność odprowadzenia nadmiernej ilości cieczy. Do wstępnego odwodnienia odpadów zaproponowano zastosowanie płytowej prasy filtracyjnej. Roczne przybliżone koszty eksploatacji wymienionych urządzeń wynoszą:

1. Odprowadzenie nadmiernej ilości wody na prasie filtracyjnej:
   - zużycie energii (przy cenie 0,25 zł/kWh) – 6 000 zł
   - robocizna (jedna roboczogodzina 8,12 zł) – 70 200 zł

     Łącznie: – 76 200 zł
2. Koszty eksploatacji brykieciarki:
   - zużycie energii – 9 000 zł
   - robocizna – 11 700 zł

     Łącznie: – 20 700 zł

Suma wszystkich kosztów eksploatacyjnych wynosi więc 96 900 zł rocznie. Ze względu na dużą wydajność eksploatacja brykieciarki odbywa się okresowo – przez jedną zmianę co 4–5 dni. Pełne wykorzystanie brykieciarki wiąże się z zakupem suszarki bębnowej do przyspieszenia procesu dosuszania odpadów. Zakup ten umożliwi jednocześnie przetworzenie większej masy odpadów przynosząc dodatkowe korzyści ekonomiczne.

Nakłady inwestycyjne

Nakłady inwestycyjne związane są głównie z zakupem urządzeń takich jak prasa filtracyjna i brykieciarka. Przybliżone ceny netto proponowanych urządzeń wynoszą [2]:

1. Prasa filtracyjna PFH-630 – 200 000,- zł.
2. Prasa walcowa (brykieciarka) PW 500: – 400 000,- zł.

   Łącznie: – 600 000,- zł.

Transport i instalacja powyższych urządzeń są wliczone w cenę zakupu. Należy również rozważyć konieczność inwestowania w inne urządzenia linii technologicznej brykietowania, a mianowicie:

- mieszalnik odpadów,
- kruszarko-rozdrabniarka,

- przenośniki taśmowe,
- wózki samowyładowcze,
- kontener zbiorczy.

W większości przedsiębiorstwach można wykorzystać istniejące tego typu urządzenia i nie zachodzi konieczność inwestowania w nowe. Tak też założono w przypadku instalacji linii do brykietowania na terenie rozpatrywanego zakładu produkcyjnego kulek łożyskowych.

Przychody ze sprzedaży brykietów

Brykietowane poszlifierskie odpady łożyskowe przeznaczone są do przetopu w hucie posiadającej elektryczne piece łukowe służące do przetopu złomu żelaza. Brykiety te mogą być dodawane jako komponent wsadu złomowego do produkcji wysokogatunkowej stali. Za takie brykiety huta skłonna jest zapłacić w granicach od 220 do 280 zł za 1 tonę i dodatkowo zwrócić pełne koszty transportu. Przewidując wielkość produkcji brykietów w wysokości 800 ton rocznie oraz zakładając cenę ich zakupu w wysokości 240 zł za tonę można uzyskać zysk w wysokości 192 000,- zł.

Zyski związane z wyeliminowaniem składowania odpadów

Przetwarzanie poszlifierskich odpadów łożyskowych i hutnicze ich wykorzystanie eliminuje koszty transportu oraz składowania na komunalnym wysypisku śmieci. Zyski z tego tytułu szacuje się na kwotę ok. 120 000 zł rocznie. Kwotę tę dopisano do zysku ze sprzedaży brykietów, co daje łącznie 312 000 zł rocznego przychodu.

Wskaźniki efektywności inwestycji

Oszacowano wartości kosztów i przychodów, które posłużyły do obliczenia wyniku na działalności gospodarczej (tabela 6.1), a następnie wskaźników efektywności inwestycji [2]. Wskaźniki efektywności inwestycyjnej obliczono z następujących wzorów [9]:

1. Okres zwrotu obliczono ze wzoru:

$$Oz = \frac{N}{Z_{br}}, \tag{6.1}$$

$$Oz = 600000/155100 = 3{,}87 \text{ lat},$$

gdzie: N – nakłady początkowe, Z_{br} – średni zysk brutto.

Tabela 6.1. Wynik na działalności gospodarczej w okresie 10-letnim

Lata / Wyszczególnienie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nakłady	600 000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Przychody	–	312 000	312 000	312 000	312 000	312 000	312 000	312 000	312 000	312 000	312 000
Koszty operacyjne	–	96 900	96 900	96 900	96 900	96 900	96 900	96 900	96 900	96 900	96 900
Amortyzacja	–	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000
Zysk/strata brutto	–	155 100	155 100	155 100	155 100	155 100	155 100	155 100	155 100	155 100	155 100
Podatek	–	43 428	40 326	37 224	34 122	34 122	34 122	34 122	34 122	34 122	34 122
Zysk/strata netto	–600 000	111 672	114 774	117 876	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978

2. Prostą stopę zwrotu obliczono ze wzoru:

$$Zc = \frac{Zn_{śr} + O(1 - d_{śr})}{N} \tag{6.2}$$

$$Zc = [119117 + 3{,}87(1 - 0{,}23)]/600000 = 0{,}20,$$

gdzie: $Zn_{śr}$ – średni zysk netto, $d_{śr}$ – średnia stopa podatku dochodowego.

3. Księgową średnią stopę zwrotu obliczono ze wzoru:

$$K_{śr} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Zn_i}{Mn_i}}{n} \tag{6.3}$$

$$K_{śr} = (111672/600000 + 114774/540000 + 117876/480000 + \\ + 120878/420000 + 120878/360000 + 120878//300000 + 120878//240000 + \\ + 120878//180000 + 120878/120000 + 120878/60000)/10 = 0{,}59,$$

gdzie: Zn_i – zysk netto w i-tym okresie obliczeniowym, Mn_i – majątek trwały netto na początek i-tego okresu obliczeniowego, n – liczba okresów obliczeniowych.

4. Wartość zaktualizowaną netto (NPV) obliczono na podstawie zestawienia przychodów i wydatków z uwzględnieniem stopy dyskonta przedstawionego w tabeli 6.2.

Tabela 6.2. Wartości przychodów i wydatków do obliczenia *NPV*

Lata / Wyszczególnienie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zysk netto	–	111 672	114 774	117 876	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978
Amortyzacja	–	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000
Wartość końcowa	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	930 600
Wydatki inwestycyjne	600 000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Strumienie pieniężne netto	-600 000	171 672	174 774	177 876	180 978	180 978	180 978	180 978	180 978	180 978	1 111 578
Współczynnik dyskonta	1	0,885	0,783	0,693	0,613	0,543	0,48	0,425	0,376	0,333	0,295
Zdyskontowana wartość strumieni	-600 000	151 930	136 848	123 268	110 940	98 271	86 869	76 916	68 048	60 266	327 916

Ze względu na niską rentowność kapitałów własnych (ROE) w branży łożyskowej, wysokość stopy dyskonta oparto o wartość rynkowej stopy procentowej (średnia rentowność bonów NBP w 2001 r. wynosiła 14%) skorygowanej o premię za ryzyko. Uwzględniając premię za ryzyko na poziomie 50% kosztu zainwestowanego kapitału, nominalny koszt kapitału wynosi 14+7 = 21%. Realny koszt kapitału przy założeniu 8% stopy inflacji obliczono na podstawie wzoru:

$$Kr = \frac{Kn - s_i}{100 + s_i} \times 100, \tag{6.4}$$

$$Kr = (13/108) \times 100 = 12{,}04\%,$$

gdzie: Kn – nominalny koszt kapitału, s_i – stopa inflacji.

Przyjęta stopa dyskontowa powinna być większa od skalkulowanego realnego kosztu kapitału – przyjęto 13%.

Wartość końcową TV obliczono ze wzoru:

$$TV = \frac{CF_n}{d}, \tag{6.5}$$

$$TV = 120978/0{,}13 = 930\ 600 \text{ zł}.$$

gdzie: CF_n – strumienie neto z ostatniego roku obliczeniowego, d – stopa dyskonta.

Wartość *NPV* obliczono ze wzoru:

$$NPV = \sum_{i=0}^{n} DCF_i \tag{6.6}$$

$$NPV = -600\,000 + 1\,241\,270 = 641\,270 \text{ zł}$$

gdzie: DCF_i – zdyskontowana wartość strumieni pieniężnych netto.

5. Wewnętrzną stopę zwrotu (*IRR*) obliczono na podstawie danych zestawionych w tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Wartości strumieni pieniężnych do obliczenia *IRR*

Lata	Strumienie pieniężne netto	Zdyskontowana wartość strumieni			
		przy stopie 30%		przy stopie 32%	
		współczynnik dyskonta	wartość	współczynnik dyskonta	wartość
1	171 672	0,769	132 055	0,758	130 055
2	174 774	0,592	103 417	0,574	100 306
3	177 876	0,455	80 963	0,435	77 338
4	180 978	0,350	63 365	0,329	59 612
5	180 978	0,269	48 743	0,250	45 160
6	180 978	0,207	37 494	0,189	34 212
7	180 978	0,159	28 842	0,143	25 918
8	180 978	0,123	22 186	0,108	19 635
9	180 978	0,094	17 066	0,082	14 875
10	1 111 578	0,073	80 632	0,062	69 215
Razem	2 721 768	–	614 763	–	576 327
Nakłady	600 000	–	600 000	–	600 000
Różnica	2 121 768	–	14 763	–	-23 673

Wewnętrzna stopa zwrotu mieści się w przedziale między 30% i 32%. Współczynnik odchylenia dodatniej nadwyżki finansowej obliczono na podstawie wzoru:

$$Wo = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \tag{6.7}$$

$$Wo = 14763/(14763+23673) = 0{,}38,$$

gdzie: *R1*, *R2* – bezwzględne wartości różnic strumieni pieniężnych.

Wewnętrzna stopa zwrotu wynosi:

$$IRR = 30 + 2 \times 0{,}38 = 30{,}76\%.$$

6. Zmodyfikowaną wewnętrzną stopę zwrotu (*MIRR*) obliczono w oparciu o dane przedstawione w tabelach 6.4 i 6.5. Z tabeli 6.4 określono parametr charakteryzujący ujemne strumienie pieniężne *CIF*. Natomiast na podstawie obliczeń z tabeli 6.5 wyznaczono parametr *COF* charakteryzujący dodatnie strumienie pieniężne.

Tabela 6.4. Obliczenie ujemnych strumieni pieniężnych

Lata / Wyszczególnienie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zysk netto	–	111 672	114 774	117 876	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978
Amortyzacja	–	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000
Wartość końcowa	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	930 600
Wydatki inwestycyjne	600 000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Strumienie pieniężne netto	-600 000	171 672	174 774	177 876	180 978	180 978	180 978	180 978	180 978	180 978	1 111 578
Współczynnik dyskonta	1	0,885	0,783	0,693	0,613	0,543	0,48	0,425	0,376	0,333	0,295
Zdyskontowane ujemne strumienie pieniężne	-600 000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Tabela 6.5. Obliczenie dodatnich strumieni pieniężnych

Lata / Wyszczególnienie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zysk netto	–	111 672	114 774	117 876	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978	120 978
Amortyzacja	–	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000
Wartość końcowa	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	930 600
Wydatki inwestycyjne	600 000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Strumienie pieniężne netto	-600 000	171 672	174 774	177 876	180 978	180 978	180 978	180 978	180 978	180 978	1 111 578
Współczynnik oprocentowania	3,395	3,004	2,658	2,353	2,082	1,842	1,63	1,443	1,277	1,13	1
Zdyskontowane dodatnie strumienie pieniężne	–	515 703	464 549	418 542	376 796	333 361	294 994	261 151	231 109	204 505	1 111 578

Wyniki obliczeń są następujące: *CIF* = 600 000 zł. oraz *COF* = 4 212 289 zł. Wskaźnik *MIRR* obliczono ze wzoru:

$$MIRR = \sqrt{\frac{CIF}{COF}} \times 100 - 100, \tag{6.8}$$

$$MIRR = \sqrt{\frac{4212289}{600000}} \times 100 - 100 = 21{,}52\%.$$

7. Wskaźnik rentowności inwestycji obliczono ze wzoru:

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^{n} DCF_i}{N}, \tag{6.9}$$

$$PI = 1241270/600000 = 2{,}07.$$

gdzie: DCF_i – zdyskontowana wartość strumieni pieniężnych netto, N – nakłady początkowe.

8. Do oceny ryzyka inwestycyjnego przyjęto prawdopodobieństwo wystąpienia inwestycji w linię do brykietowania na poziomie 80%. Dane do obliczenia współczynnika zmienności przedstawiono w tabeli 6.6.

Współczynnik zmienności obliczono ze wzoru [8]:

$$CV_{NPV} = \frac{S_{NPV}}{E_{NPV}} \times 100, \tag{6.10}$$

$$CV_{NPV} = (84\,068 / 875\,487) \times 100 = 9{,}60\%,$$

gdzie: S_{NPV} – odchylenie standardowe, E_{NPV} – zdyskontowana wartość oczekiwana.

Współczynnik zmienności informuje, że zaktualizowana wartość przepływów netto analizowanej inwestycji może różnić się od wartości oczekiwanej o 9,6%. Niski poziom wskaźnika zmienności wskazuje, że ryzyko związane z realizacją tego projektu jest bardzo małe.

Tabela 6.6. Wyliczenie parametrów do obliczenia współczynnika zmienności

Lata / Wyszczególnienie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Strumienie pieniężne netto	171 672	174 774	177 876	180 978	180 978	180 978	180 978	180 978	180 978	1 111 578
Prawdopodobieństwo wystąpienia inwestycji	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Wartość oczekiwana	137 338	139 819	142 301	144 782	144 782	144 782	144 782	144 782	144 782	889 262
Współczynnik dyskonta dla d = 13%	0,885	0,783	0,693	0,613	0,543	0,480	0,425	0,376	0,333	0,295
Zdyskontowana wartość oczekiwana	121 544	109 478	98 614	88 752	78 617	69 496	61 533	54 438	48 213	262 332
	993 016									
Odchylenie od wartości oczekiwanej	34 334	34 955	35 575	36 196	36 196	36 196	36 196	36 196	36 196	222 316
Wariancja	1178851023	1221838043	1265594855	1310121459	1310121459	1310121459	1310121459	1310121459	1310121459	49424226003
	60 951 238 681									
Zdyskontowana wariancja	1043283156	956699188	877057235	803104455	711395952	628858301	556801620	492605669	436270446	14580146671
Odchylenie standardowe	**145 211**									

Wyniki obliczeń wskaźników efektywności sugerują opłacalność realizacji proponowanej inwestycji. Świadczy o tym niski okres zwrotu zainwestowanych kapitałów oraz wysoka ich rentowność. Warto zwrócić uwagę na wskaźnik wartości zaktualizowanej netto pokazujący, że inwestycja ta nie straci szybko na wartości. Cechą szczególną inwestycji jest wysoka wewnętrzna stopa zwrotu, co sprawia, że można brać pod uwagę finansowanie kredytem bankowym. Wyniki obliczeń współczynnika zmienności pokazały, że ryzyko związane z realizacją projektu jest bardzo małe, co ostatecznie przesądza o podjęciu pozytywnej decyzji inwestycyjnej w linię do brykietowania odpadów poszlifierskich. Inwestycja w linię technologiczną do brykietowania odpadów ma charakter proekologiczny i jej wdrożenie pozwoli producentowi zyskać opinię nie zanieczyszczającego środowiska naturalnego.

6.4. Piśmienictwo

1. Biznez plan Fabryki Łożysk Tocznych „Kraśnik" S.A. Kraśnik 2001.
2. Borowski G. 2002: Ocena efektywności inwestycji jako podstawa wyboru technologii utylizacji łożyskowych drobnoziarnistych odpadów poszlifierskich. Materiały V Konferencji „Komputerowo zintegrowane zarządzanie", WN-T Warszawa: 118–126.
3. Borowski G. 2005: Badania odpadów poszlifierskich przemysłu łożyskowego w aspekcie ich użytkowego wykorzystania. Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska.
4. Dz.U. 97.78.483: Konstytucja RP.
5. Dz.U. 01.62.627: Prawo ochrony środowiska.
6. Dz.U. 01.62.628: Ustawa o odpadach.
7. Dz.U. 01.63.639: Ustawa o obowiązkach przedsiębiorców w zakresie gospodarowania niektórymi odpadami.
8. Janik W. 2000: Zarządzanie finansami firmy. Wyższa Szkoła Przedsiębiorczości i Administracji, Lublin.
9. Sawicka B., Zbroja A. 2001: Zarządzanie finansami firmy. Przykłady i zadania. Wyższa Szkoła Przedsiębiorczości i Administracji, Lublin.
10. Stochlak J. 2002: Polskie prawo ochrony środowiska. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
11. Słupek S., Buczek A., Giełżecki J. 1999: Ekologiczne i technologiczne aspekty wykorzystania powalcowniczych mułków zgorzelinowych w procesie wielkopiecowym. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 5: 235–239.
12. Waśniewski T., Skoczylas W. 1997: Zasady analizy finansowej w praktyce. Fundacja Rozwoju Rachunkowości w Polsce, Warszawa.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W monografii przedstawiono efektywną metodę zagospodarowania łożyskowych odpadów poszlifierskich. Zastosowanie opracowanej metody pozwoliło otrzymać jednorodnie scalone brykiety, o żądanym kształcie i wymiarach oraz określonej wytrzymałości mechanicznej. Brykiety te nadają się do wykorzystania podczas wytapiania stali w piecach stalowniczych. Brykietowanie poszlifierskich odpadów łożyskowych w celu ich przetopienia w piecu hutniczym nie było dotychczas w Polsce na przemysłową skalę wdrażane. Rozwiązanie tego zagadnienia wymagało weryfikacji dotychczas stosowanych sposobów utylizacji metalonośnych materiałów drobnoziarnistych z uwzględnieniem specyficznych wymogów hutnictwa. W celu określenia korzystnych parametrów procesu brykietowania drobnoziarnistych odpadów przemysłowych opracowano i przeprowadzono badania doświadczalne.

Do badań wykorzystano odpady poszlifierskie z produkcji kulek łożyskowych wytwarzane przez Fabrykę Łożysk Tocznych w Kraśniku. Określono czynniki wpływające na właściwości odpadów oraz parametry urządzeń i procesów przetwórczych pozwalające uzyskać brykiety o odpowiedniej wytrzymałości. Zbadano skład chemiczny odpadu, jego właściwości fizyczne, dobrano odpowiednie lepiszcza oraz urządzenia przetwórcze.

Odpady cechują się dużą zawartością żelaza oraz stosunkowo niewielkim zanieczyszczeniem olejami. Ze względu na obecność chromu odpady te klasyfikuje się jako niebezpieczne dla środowiska naturalnego. Podczas przetopienia ilość chromu uległa jednak znacznemu zmniejszeniu i była ona zbliżona do zawartości w większości stali węglowych.

Łożyskowe odpady poszlifierskie wykazały dobrą podatność na scalanie w prasach do brykietowania. Do scalania wykorzystano prasę stemplową oraz walcową. Stwierdzono większą przydatność stosowania prasy walcowej ze względu na ciągły charakter pracy, mniejsze zużycie energii oraz dłuższą żywotność elementów formujących.

Badania brykietowania poprzedzono odpowiednim przygotowaniem materiału oraz doborem parametrów scalania. Przygotowanie materiału obejmowało zagęszczanie odpadu w płytowej prasie filtracyjnej, następnie określenie rodzaju i zawartości lepiszcza oraz najkorzystniejszego zakresu wilgotności mieszanki. Wykazano, że zastosowanie prasy filtracyjnej jest szybkim i skutecznym sposobem usunięcia nadmiaru wilgoci z osadu poszlifierskiego.

Podczas prób laboratoryjnych uzyskano dobre jakościowo brykiety dodając melasę jako lepiszcze – korzystnie przy ilości ok. 8%. Sprawdzono, że mieszanka podatna jest na dosuszenie w warunkach naturalnych oraz z zastosowaniem suszarki. Korzystne jest doprowadzenie jej do wilgotności w zakresie 4,5–5,5%.

Wytworzone brykiety sezonowano. Sezonowanie wpływa korzystnie na właściwości mechaniczne brykietów z melasą. Występuje zachowanie wytrzymałości brykietów nawet podczas czteromiesięcznego okresu sezonowania.

Próby brykietowania odpadów poszlifierskich potwierdziły przydatność zastosowania prasy walcowej wraz z układem formującym umożliwiającym wytwarzanie brykietów w kształcie „siodła". Uzyskano trwałe i wytrzymałe brykiety spełniające dopuszczalne wymogi hutnictwa i nadające się do użytkowego wykorzystania jako komponent wsadu pieca stalowniczego. Struktura brykietów była jednorodna i nie stwierdzono widocznych wad w postaci pęknięć i pęcherzy.

Wykonane próby przetapiania brykietów w laboratoryjnym piecu łukowym potwierdziły ich metalurgiczną użyteczność. Podczas przetopu brykietów nie stwierdzono zwiększonej szkodliwości emisji do atmosfery w porównaniu do przetopu samego złomu stalowego.

Wyniki badań eksperymentalnych i prób hutniczych pozwoliły opracować dwa warianty przemysłowych linii technologicznych do brykietowania łożyskowych odpadów poszlifierskich. Przedsiębiorca może wybrać wariant dosuszania odpadów w warunkach naturalnych lub przy pomocy suszarki bębnowej.

Przeprowadzono analizę finansową inwestycji w wariant linii technologicznej z dosuszaniem naturalnym, która wykazała duże korzyści ekonomiczne. Inwestycja ta charakteryzuje się szybkim zwrotem zainwestowanych kapitałów oraz wysoką ich rentownością. Wykazano również, że ryzyko związane z realizacją projektu jest stosunkowo małe.

Wnioski końcowe

1. Wprowadzenie metody przetwarzania drobnoziarnistych metalowych odpadów przemysłowych na brykiety przy pomocy nacisku mechanicznego jest korzystne pod warunkiem ich hutniczego wykorzystania.
2. Realizowanie procesu brykietowania podanych odpadów na skalę przemysłową zaleca się przeprowadzać w prasach walcowych. Zastosowanie powierzchni formujących umożliwiających uformowanie brykietów w postaci „siodła" pozwala uzyskać wyroby o wysokiej wytrzymałości mechanicznej.
3. Zapewnienie odpowiednich dla wyrobu właściwości mechanicznych uzyskano przez zastosowanie lepiszcza oraz doprowadzenie odpadowej mieszanki do optymalnej wilgotności. Dodanie melasy w ilości ok. 8% brykietowanej masy odpadów oraz dosuszenie mieszanki do wilgotności 4,5 – 5,5% zapewniło najbardziej korzystne warunki w realizowanym procesie. Odpady te podatne są na dosuszanie zarówno w warunkach naturalnych jak i w suszarkach, przy czym sezonowanie brykietów z melasą korzystnie wpływa na ich jakość.

4. Stwierdzono dobrą podatność na zagęszczanie i scalanie łożyskowych odpadów poszlifierskich. Szybki i skuteczny sposób zagęszczania tych odpadów zapewnia zastosowanie płytowej prasy filtracyjnej.
5. Przeprowadzone badania procesów przetopienia brykietowanych odpadów poszlifierskich w laboratoryjnym piecu elektrycznym potwierdziły przydatność tych brykietów w procesie wytapiania stali. Skład chemiczny wytopów z brykietami był zbliżony do otrzymanego z procesu wytapiania stali ze złomu stalowego. Obecność w brykietach zanieczyszczeń olejowych i melasy jako lepiszcza nie spowodowało zakłóceń w procesie stalowniczym oraz nie powodowało zwiększenia emisji szkodliwych gazów i pyłów.
6. Otrzymane rezultaty prac analityczno-doświadczalnych przy równocześnie pozytywnych wynikach prób wykorzystania otrzymanych brykietów jako dodatku do procesu wytapiania stali pozwoliły na opracowanie koncepcji dwóch wariantów przemysłowej linii technologicznej scalania łożyskowych odpadów poszlifierskich w formie brykietów.
7. Wdrożenie opracowanej metody produkowania brykietów w zakładach wytwarzających znaczne ilości łożysk i elementów łożyskowych pozwoli na korzystne ekologicznie i ekonomicznie zagospodarowanie odpadów produkcyjnych. Korzyści zmniejszenia zużycia materiałowego i kosztów produkcyjnych idą w parze ze znaczącym zmniejszeniem zanieczyszczenia środowiska naturalnego.
8. Opracowana koncepcja zagospodarowania odpadów poszlifierskich dotyczy tylko przemysłu łożyskowego. Przyjęte rozwiązanie można także zastosowć w innych przedsiębiorstwach, gdzie uzasadniona jest potrzeba użytkowego wykorzystania znacznej ilości odpadów drobnoziarnistych.

UTILIZATION OF THE FINE-GRAINED METAL WASTES

An effective method of managing fine-grained bearing industry wastes were presented. The complex analysis of preparing wastes and their adequte forming by mechanical stress may be enable to manufacture of product, which will be used for steelmaking.

Metal wastes in the studies came from the production of bearing balls run at the Rolling Bearing Factory in Kraśnik. There were defined factors affecting physical properties of wastes, their chemical composition was studied and both proper binders and processing equipment were selected. The wastes were found to be quite easily agglomerated in the briquetting presses.

To gain suitable briquettes, it was necessary to work out a method to get the material ready and choose particular process parameters. The studies allowed to define material preparation procedure that included its consolidation, binder addition and drying up. It was noted that molasses-added briquettes tended to be of a high quality. The studies proved that briquette seasoning was advantageous.

The experiments confirmed that a roll press together with a forming unit allowed to generate ”saddle-shaped” briquettes which were fully suitable to briquette metal wastes. The stable and resistant briquettes were obtained. In addition, they appeared to meet the requirements of the metallurgical industry and could be used as a component of steelmaking furnaces charge. The briquette structure was homogenous and no defects such as cracks or holes were observed.

The experiments on briquette melting in the electric furnace certified their metallurgical usability. There were no harmful emissions to the atmosphere during the process. The results of both the experiments and metallurgical trials allow to design two conceptions of industry technological line to briquette bearing metal wastes.

Implementation of the technology of bearing metal wastes utilization will be profitable from an ecological and economical point of view. The method to manage the wastes is a model solution to the problem that presently exists in the bearing industry factories. However, it may be successfully applied in many other enterprises producing metal-carrying fine-grained wastes.