



Politechnika Wroclawska

DZIEDZINA: NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA: INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

POZYSKIWANIE WYBRANYCH SUROWCÓW METALICZNYCH Z CIAŁ MACIERZYSTYCH CHONDRYTÓW ZWYCZAJNYCH

Mgr inż. Konrad Blutstein

Promotor:

prof. dr hab. Tadeusz Przylibski

Słowa kluczowe: chondryt zwyczajny, planetoida typu S, kruszenie, mielenie, ruda Fe-Ni-Co, ruda chondrytowa

WROCLAW, CZERWIEC 2023

SPIS TREŚCI

| | |
|---|----|
| 1. Wstęp..... | 11 |
| 2. Eksploatacja surowców pozaziemskich | 14 |
| 2.1. Podział surowców..... | 14 |
| 2.2. Surowce pozaziemskie | 15 |
| 2.3. Proponowane technologie i techniki eksploatacji..... | 20 |
| 3. Procesy wzbogacania i przeróbki | 23 |
| 3.1. Wstęp..... | 23 |
| 3.2. Klasyfikacja hydrauliczna | 25 |
| 3.3. Separacja w cienkiej strudze cieczy | 25 |
| 3.4. Separacja w cieczach ciężkich..... | 26 |
| 3.5. Separacja magnetyczna | 26 |
| 3.6. Separacja z wykorzystaniem indukcji elektromagnetycznej..... | 27 |
| 3.7. Separacja z wykorzystaniem prądów wirowych..... | 27 |
| 3.8. Separacja elektryczna | 28 |
| 3.9. Flotacja | 28 |
| 3.10. Aglomeracja olejowa..... | 30 |
| 3.11. Separacja z wykorzystaniem właściwości mechanicznych ziaren mineralnych | 30 |
| 3.12. Troilit (FeS) - niepożądany składnik rudy chondrytowej..... | 30 |
| 4. Skały reprezentujące planetoidy macierzyste chondrytów zwyczajnych..... | 32 |
| 4.1. Charakterystyka ciał macierzystych chondrytów zwyczajnych | 32 |
| 4.2. Budowa chondrytów zwyczajnych..... | 35 |
| 4.3. Podział chondrytów | 36 |
| 4.4. Skład mineralny i chemiczny chondrytów zwyczajnych..... | 40 |
| 5. Cele pracy i teza | 43 |
| 6. Materiał badawczy | 44 |
| 6.1. Tamdakht..... | 44 |
| 6.2. NWA 6410 | 44 |
| 7. Metody badań..... | 46 |
| 7.1. Wstęp..... | 46 |
| 7.2. Mikroskop petrograficzny oraz mikroskop stereoskopowy | 46 |
| 7.3. Analiza chemiczna oraz mineralna rudy chondrytowej..... | 48 |
| 7.4. Procesy kruszenia oraz mielenia skały rudnej..... | 49 |
| 7.4.1. Tamdakht | 49 |
| 7.4.2. NWA 6410 | 50 |
| 7.5. Analiza sitowa | 51 |
| 7.5.1. Tamdakht | 51 |

| | |
|--|-----|
| 7.5.2. NWA 6410 | 51 |
| 7.6. Separacja magnetyczna | 52 |
| 7.7. Separacja w cieczy ciężkiej | 52 |
| 7.8. Separacja na stole koncentracyjnym..... | 52 |
| 7.9. Flotacja | 52 |
| 7.10. Analiza mineralna produktów procesów przeróbczych..... | 53 |
| 7.11. Analiza chemiczna produktów procesów przeróbczych..... | 54 |
| 8. Wyniki badań | 55 |
| 8.1. Analiza składu mineralnego i ziarnowego (badania mikroskopowe)..... | 55 |
| 8.1.1. Tamdakht | 55 |
| 8.1.2. NWA 6410 | 65 |
| 8.2. Analiza składu mineralnego i chemicznego (badanie w mikroobszarze)..... | 74 |
| 8.2.1. Tamdakht | 74 |
| 8.2.2. NWA 6410 | 84 |
| 8.3. Analiza ziarnowa nadawy do procesów przeróbczych | 96 |
| 8.3.1. Tamdakht | 96 |
| 8.3.2. NWA 6410 | 98 |
| 8.4. Kruszenie oraz mielenie rudy chondrytowej jako proces wzbogacania | 101 |
| 8.4.1. Tamdakht | 101 |
| 8.4.2. NWA 6410 | 105 |
| 8.5. Separacja magnetyczna | 108 |
| 8.6. Separacja w cieczy ciężkiej | 109 |
| 8.7. Separacja na stole koncentracyjnym..... | 110 |
| 8.8. Flotacja | 113 |
| 8.1.1. Tamdakht | 113 |
| 8.1.2. NWA 6410 | 114 |
| 8.9. Analiza wzbogacania wybranych metali oraz siarki | 115 |
| 8.9.1. Żelazo..... | 116 |
| 8.9.2. Nikiel..... | 118 |
| 8.9.3. Kobalt..... | 119 |
| 8.9.4. Miedź | 121 |
| 8.9.5. Siarka | 122 |
| 9. Wnioski | 125 |
| 10. Literatura | 127 |

SPIS RYSUNKÓW

| | |
|---|----|
| Rysunek 6.1. Meteoryt Tamdakht (źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tamdakht_meteorite_small.jpg) | 44 |
| Rysunek 7.1. Mikroskop petrograficzny użyty w badaniach | 47 |
| Rysunek 7.2. Mikroskop stereoskopowy użyty w badaniach..... | 47 |
| Rysunek 7.3. Mikrosonda elektronowa wykorzystana do badań | 48 |
| Rysunek 7.4. Kruszarka szczękowa wykorzystana do badań..... | 49 |
| Rysunek 7.5. Młyn kulowy wykorzystany do badań | 50 |
| Rysunek 7.6. Przesiewacz wibracyjny wykorzystany do badań | 51 |
| Rysunek 7.7. Laboratoryjna maszynka flotacyjna typu Mechanobr. | 53 |
| Rysunek 8.1. Obraz mikroskopowy płytki cienkiej uzyskanej z chondrytu Tamdakht | 55 |
| Rysunek 8.2. Udział ziaren FeNi (ich liczby) poszczególnych frakcji w meteorycie Tamdakht | 56 |
| Rysunek 8.3. Krzywa skumulowana składu ziarnowe FeNi w meteorycie Tamdakht | 56 |
| Rysunek 8.4. Udział ziaren FeNi (ich masy) poszczególnych frakcji w meteorycie Tamdakht . | 57 |
| Rysunek 8.5. Krzywa składu ziarnowe FeNi (masa) skumulowana w meteorycie Tamdakht.... | 57 |
| Rysunek 8.6. Udział ziaren troilitu (ich liczby) poszczególnych frakcji w meteorycie Tamdakht | 58 |
| Rysunek 8.7. Krzywa skumulowana składu ziarnowe troilitu w meteorycie Tamdakht..... | 59 |
| Rysunek 8.8. Udział ziaren troilitu (ich masy) poszczególnych frakcji w meteorycie Tamdakht | 59 |
| Rysunek 8.9. Krzywa skumulowana składu ziarnowego troilitu (masa) w meteorycie Tamdakht | 60 |
| Rysunek 8.10. Chondra piroksenowa promienista w chondrycie Tamdakht | 60 |
| Rysunek 8.11. Chondra oliwinowa porfirowa..... | 61 |
| Rysunek 8.12. Chondra piroksenowa..... | 61 |
| Rysunek 8.13. Chondra szklista/bogata w glin | 62 |
| Rysunek 8.14. Chondra porfirowa oliwinowa..... | 62 |
| Rysunek 8.15. Ziarna stopu FeNi (jasne) oraz troilitu (ciemniejsze) | 63 |
| Rysunek 8.16. Ziarno stopu FeNi ulegające wietrzeniu | 63 |
| Rysunek 8.17. Porowate ziarno troilitu | 64 |
| Rysunek 8.18. Ziarna stopu FeNi oraz troilitu wokół chondry przedstawionej na rysunku 8.13 | 64 |
| Rysunek 8.19. Ziarno chromitu | 65 |
| Rysunek 8.20. Obraz mikroskopowy płytki cienkiej uzyskanej z chondrytu NWA 6410 | 66 |
| Rysunek 8.21. Udział ziaren FeNi (ich liczby) poszczególnych frakcji w meteorycie NWA 6410. | 67 |
| Rysunek 8.22. Krzywa skumulowana składu ziarnowego FeNi w meteorycie NWA 6410 | 67 |
| Rysunek 8.23. Udział ziaren FeNi (ich masy) poszczególnych frakcji w meteorycie NWA 6410 | 68 |
| Rysunek 8.24. Krzywa skumulowana składu ziarnowe FeNi (masa) dla meteorytu NWA 6410 | 68 |

| | |
|--|----|
| Rysunek 8.25. Udział ziaren troilitu (ich liczby) poszczególnych frakcji w meteorycie NWA 6410..... | 69 |
| Rysunek 8.26. Krzywa skumulowana składu ziarnowego troilitu w meteorycie NWA 6410 | 69 |
| Rysunek 8.27. Udział ziaren troilitu (ich masy) poszczególnych frakcji w meteorycie NWA 6410..... | 70 |
| Rysunek 8.28. Krzywa skumulowana składu ziarnowego troilitu (masa) w meteorycie NWA 6410..... | 70 |
| Rysunek 8.29. Chondra piroksenowa promienista..... | 71 |
| Rysunek 8.30. Chondra piroksenowa promienista..... | 72 |
| Rysunek 8.31. Stop FeNi oraz troilit..... | 72 |
| Rysunek 8.32. Ziarno troilitu | 73 |
| Rysunek 8.33. Ziarno chromitu, poniżej ziarna troilitu..... | 73 |
| Rysunek 8.34. Ziarno stopu FeNi (białe), chromitu (szare) oraz troilitu (żółte)..... | 74 |
| Rysunek 8.35. Chondra szklista bogata w glin. Obraz BSE..... | 75 |
| Rysunek 8.36. Mapa rozkładu pierwiastków chondry bogatej w glin. A — glin, B — wapń, C — chrom, D — żelazo, E — potas, F — magnez, G — sód, H — krzem..... | 76 |
| Rysunek 8.37. Zależność zawartości miedzi od stosunku Ni/Fe dla stopu FeNi w meteorycie Tamdakht..... | 77 |
| Rysunek 8.38. Zależność zawartości kobaltu od stosunku Ni/Fe dla stopu FeNi w meteorycie Tamdakht..... | 78 |
| Rysunek 8.39. Wykres WDS ziarna kamacytu pochodzącego z meteorytu Tamdakht..... | 78 |
| Rysunek 8.40. Wykres WDS ziarna taenitu pochodzącego z meteorytu Tamdakht | 78 |
| Rysunek 8.41. Ziarno stopu FeNi w meteorycie Tamdakht (obraz BSE). Faza jaśniejsza – taenit, faza ciemniejsza – kamacyt..... | 79 |
| Rysunek 8.42. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków w ziarnach stopu FeNi w meteorycie Tamdakht. A — żelazo, B – nikiel, C – kobalt, D – miedź..... | 79 |
| Rysunek 8.43. Ziarno stopu FeNi wraz ze współwystępującymi ziarnami troilitu oraz chromitu w chondrycie Tamdakht | 81 |
| Rysunek 8.44. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków dla obszaru z rysunku X. A – glin, B – chrom, C – mangan, D – tytan, E – wanad..... | 81 |
| Rysunek 8.45. Wykres WDS dla chromitu | 82 |
| Rysunek 8.46. Wykres WDS dla wybranego ziarna miedzi rodzimej | 83 |
| Rysunek 8.47. Ziarno miedzi rodzimej w chondrycie Tamdakht (obraz BSE)..... | 83 |
| Rysunek 8.48. Ziarna miedzi rodzimej uchwycone na mapach rozkładu zawartości Cu w meteorycie Tamdakht..... | 84 |
| Rysunek 8.49. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków chondry piroksenowej. A – glin, B – wapń, C – żelazo, D – magnez, E – sód, F – krzem..... | 85 |
| Rysunek 8.50. Zależność zawartości miedzi od stosunku Ni/Fe dla stopu FeNi w meteorycie NWA 6410 | 86 |
| Rysunek 8.51. Zależność zawartości kobaltu od stosunku Ni/Fe dla stopu FeNi w meteorycie NWA 6410 | 87 |

| | |
|---|-----|
| Rysunek 8.52. Wykres WDS kamacytu pochodzącego z meteorytu NWA 6410 | 87 |
| Rysunek 8.53. Ziarno stopu FeNi w meteorycie NWA 6410 (obraz BSE). Faza jaśniejsza – taenit, faza ciemniejsza – kamacyt | 87 |
| Rysunek 8.54. Ziarno troilitu (ciemnoszare, porowate) oraz ziarno stopu FeNi (jasny – taenit, ciemniejszy – kamacyt) | 88 |
| Rysunek 8.55. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków w ziarnach stopu FeNi oraz troilitu w meteorycie NWA 6410. A – kobalt, B – miedź, C – nikiel, D – siarka, E – żelazo | 89 |
| Rysunek 8.56. Ziarno chromitu (ciemny szary) oraz ziarno stopu FeNi (białe). Po prawej widoczne także ziarno troilitu (jasnoszare) – obraz BSE | 90 |
| Rysunek 8.57. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków w chromicie z obszaru przedstawionego na rysunku X. A – glin, B – chrom, C – mangan, D – tytan, E – wanad | 90 |
| Rysunek 8.58. Obraz BSE chondry, wokół której znajdują się ziarna chromitu, troilitu oraz stopu FeNi | 91 |
| Rysunek 8.59. Obraz BSE chondry, wokół której znajdują się ziarna chromitu, troilitu oraz stopu FeNi | 91 |
| Rysunek 8.60. Mapy rozkładu zawartości pierwiastków dla obszaru przedstawionego na rysunku X. A – glin, B – chrom, C – żelazo, D – magnez, E – siarka, F – krzem, G – tytan, H – cynk, I – nikiel | 92 |
| Rysunek 8.61. Mapy rozkładu zawartości pierwiastków dla obszaru przedstawionego na rysunku X. A – glin, B – chrom, C – żelazo, D – magnez, E – siarka, F – krzem, G – tytan, H – cynk, I – nikiel | 93 |
| Rysunek 8.62. Obraz BSE ziarna apatyty (jasnoszare) | 94 |
| Rysunek 8.63. Mapy rozkładu zawartości pierwiastków ziarna apatyty przedstawionego na rysunku X. A – wapń, B – chlor, C – fosfor | 95 |
| Rysunek 8.64. Wykres WDS dla ziarna galeny odnalezionej w meteorycie NWA 6410 | 95 |
| Rysunek 8.65. Ziarna galeny uchwycone na mapach rozkładu zawartości pierwiastków w meteorycie NWA 6410 | 95 |
| Rysunek 8.66. Ziarna frakcji o średnicy powyżej 500 μm z meteorytu Tamdakht. Na górze ziarna po analizie sitowej, na dole ziarna oczyszczone z pyłu. Widoczne silnie odbijające światło powierzchnie to powierzchnie ziaren FeNi, natomiast lekko żółtawe powierzchnie stanowią niezidentyfikowane związki chemicznie utlenionego żelaza lub niezidentyfikowane minerały wchodzące w skład frakcji pylastej | 98 |
| Rysunek 8.67. Ziarna frakcji o średnicy powyżej 500 μm z meteorytu NWA 6410. W górnym lewym rogu ziarna po analizie sitowej, pozostałe ziarna oczyszczone z pyłu. Widoczne silnie odbijające światło powierzchnie to powierzchnie ziaren FeNi, natomiast lekko żółtawe powierzchnie stanowią niezidentyfikowane związki chemicznie utlenionego żelaza lub niezidentyfikowane minerały wchodzące w skład frakcji pylastej | 101 |
| Rysunek 8.68. Produkty uzyskane w wyniku separacji w cieczy ciężkiej meteorytu Tamdakht | 109 |
| Rysunek 8.69. Roztwory cieczy ciężkiej po przeprowadzeniu separacji rudy chondrytowej ... | 110 |
| Rysunek 8.70. Produkty separacji na stole koncentracyjnym nadawy o frakcji poniżej 100 μm | 111 |
| Rysunek 8.71. Produkty separacji na stole koncentracyjnym nadawy o frakcji poniżej 100 μm | 111 |

SPIS TABEL

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1. Najważniejsze surowce naturalne..... | 14 |
| Tabela 2.2. Średnia zawartość wybranych pierwiastków w skorupie ziemskiej (Wedepohl, 1995), chondrytach węglistych CI oraz w chondrytach zwyczajnych H, L i LL (McSween i Huss, 2010). Kolorem czerwonym oznaczono zawartości mniejsze niż w skorupie ziemskiej, a zielonym większe od średniej zawartości w skorupie ziemskiej..... | 16 |
| Tabela 2.3. Wzbogacenie skał macierzystych chondrytów zwyczajnych w wybrane pierwiastki względem ich średniej zawartości w skorupie ziemskiej. Pogrubioną czcionką wyróżniono zawartości w skałach grup chondrytów zwyczajnych charakteryzujące się największym wzbogaceniem wybranego pierwiastka względem średniej zawartości w skorupie ziemskiej... 18 | |
| Tabela 2.4. Średnie wzbogacenie ciał macierzystych względem skorupy Ziemskiej wśród grup meteorytów o największej zawartości wybranych pierwiastków (McSween i Huss, 2010)..... | 19 |
| Tabela 2.5. Zawartość poszczególnych pierwiastków w skałach księżycowych (Ebihara i in., 1992) w porównaniu do średniej zawartości tych pierwiastków w skorupie ziemskiej..... | 20 |
| Tabela 4.1. Klasyfikacja chondrytów (na podstawie Weisberg i in., 2006, z modyfikacjami autora)..... | 37 |
| Tabela 4.2. Kryteria dla poszczególnych typów petrograficznych na podstawie Grady i in. (2014) oraz McSween i Huss (2010) wg Van Schmus-Wooda..... | 39 |
| Tabela 4.3. Kryteria dla poszczególnych stopni szokowych wg Grady i in. (2014)..... | 39 |
| Tabela 8.1. Skład tlenkowy krzemianów i glinokrzemianów w meteorycie Tamdakht..... | 75 |
| Tabela 8.2. Skład chemiczny stopu FeNi w meteorycie Tamdakht..... | 77 |
| Tabela 8.3. Skład chemiczny troilitu w meteorycie Tamdakht..... | 80 |
| Tabela 8.4. Skład chemiczny chromitu w meteorycie Tamdakht..... | 80 |
| Tabela 8.5. Skład chemiczny fosforanów w meteorycie Tamdakht..... | 82 |
| Tabela 8.6. Skład tlenkowy krzemianów i glinokrzemianów w meteorycie NWA 6410..... | 85 |
| Tabela 8.7. Skład chemiczny stopu FeNi w meteorycie NWA 6410..... | 86 |
| Tabela 8.8. Skład chemiczny troilitu w meteorycie NWA 6410..... | 88 |
| Tabela 8.9. Skład chemiczny chromitu w meteorycie NWA 6410..... | 89 |
| Tabela 8.10. Skład chemiczny fosforanów w meteorycie NWA 6410..... | 94 |
| Tabela 8.11. Skład ziarnowy nadawy z meteorytu Tamdakht..... | 96 |
| Tabela 8.12. Przebieg procesu mielenia meteorytu Tamdakht..... | 96 |
| Tabela 8.13. Zmiana masy poszczególnych frakcji w czasie mielenia meteorytu Tamdakht..... | 97 |
| Tabela 8.14. Wynik mielenia chondrytu NWA 6410 w urządzeniach Cryomill oraz RS 200..... | 98 |
| Tabela 8.15. Skład ziarnowy nadawy z meteorytu NWA 6410..... | 99 |
| Tabela 8.16. Przebieg procesu mielenia meteorytu NWA 6410..... | 99 |
| Tabela 8.17. Zmiana masy poszczególnych frakcji w czasie mielenia meteorytu NWA 6410..... | 100 |
| Tabela 8.18. Wyniki analizy mineralnej chondrytu Tamdakht po rozdrobnieniu..... | 102 |
| Tabela 8.19. Bilans separacji stopu FeNi na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu Tamdakht..... | 102 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 8.20. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze rozdrabniania I rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu Tamdakht..... | 102 |
| Tabela 8.21. Wyniki analizy mineralnej chondrytu Tamdakht po rozdrobieniu, obejmujące również frakcję powyżej 500 µm | 103 |
| Tabela 8.22. Bilans separacji stopu FeNi na drodze rozdrabniania I rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu Tamdakht..... | 103 |
| Tabela 8.23. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze rozdrabniania I rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu Tamdakht..... | 103 |
| Tabela 8.24. Analiza składu ziarnowego poszczególnych frakcji meteorytu Tamdakht po rozdrobieniu..... | 104 |
| Tabela 8.25. Asocjacje dla frakcji poniżej 100 µm (Tamdakht) | 104 |
| Tabela 8.26. Asocjacje dla frakcji powyżej 100 µm (Tamdakht) | 105 |
| Tabela 8.27. Wyniki analizy składu mineralnego chondrytu NWA 6410 po rozdrobieniu | 105 |
| Tabela 8.28. Bilans separacji stopu FeNi na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu NWA 6410 | 106 |
| Tabela 8.29. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu NWA 6410 | 106 |
| Tabela 8.30. Wyniki analizy mineralnej chondrytu NWA 6410 po rozdrobieniu, obejmujące również frakcję powyżej 500 µm | 106 |
| Tabela 8.31. Bilans separacji stopu FeNi na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu NWA 6410 | 107 |
| Tabela 8.32. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu NWA 6410 | 107 |
| Tabela 8.33. Analiza składu ziarnowego poszczególnych frakcji meteorytu NWA 6410 po rozdrobieniu..... | 107 |
| Tabela 8.34. Asocjacje mineralne dla frakcji poniżej 100 µm (NWA 6410)..... | 108 |
| Tabela 8.35. Asocjacje dla frakcji powyżej 100 µm (NWA 6410)..... | 108 |
| Tabela 8.36. Wychody poszczególnych frakcji po separacji w cieczy ciężkiej chondrytu Tamdakht..... | 109 |
| Tabela 8.37. Wychody poszczególnych frakcji po separacji na stole koncentracyjnym chondrytu Tamdakht..... | 112 |
| Tabela 8.38. Wyniki analizy składu mineralnego chondrytu Tamdakht po separacji na stole koncentracyjnym | 112 |
| Tabela 8.39. Bilans separacji stopu FeNi na stole koncentracyjnym dla meteorytu Tamdakht | 112 |
| Tabela 8.40. Bilans separacji troilitu (FeS) na stole koncentracyjnym dla meteorytu Tamdakht | 112 |
| Tabela 8.41. Wyniki analizy składu mineralnego chondrytu Tamdakht po separacji na drodze flotacji..... | 113 |
| Tabela 8.42. Bilans separacji stopu FeNi na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego dla meteorytu Tamdakht | 114 |
| Tabela 8.43. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego dla meteorytu Tamdakht | 114 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 8.44. Bilans separacji stopu FeNi na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego dla meteorytu Tamdakht | 114 |
| Tabela 8.45. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego dla meteorytu Tamdakht | 114 |
| Tabela 8.46. Wyniki analizy składu mineralnego chondrytu NWA 6410 po separacji na drodze flotacji..... | 115 |
| Tabela 8.47. Bilans separacji stopu FeNi na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego dla meteorytu NWA 6410..... | 115 |
| Tabela 8.48. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego dla meteorytu NWA 6410..... | 115 |
| Tabela 8.49. Zawartość żelaza w minerałach występujących w chondrytach Tamdakht oraz NWA 6410 | 116 |
| Tabela 8.50. Bilans separacji minerałów zawierających żelazo. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa, k – współczynnik wzbogacania. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | 117 |
| Tabela 8.51. Uzysk stopu FeNi oraz żelaza w procesach przeróbczych | 117 |
| Tabela 8.52. Zawartość niklu w minerałach występujących w chondrytach Tamdakht oraz NWA 6410..... | 118 |
| Tabela 8.53. Bilans separacji minerałów zawierających nikiel. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa, k – współczynnik wzbogacania. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | 118 |
| Tabela 8.54. Uzysk stopu FeNi oraz niklu w procesach przeróbczych..... | 119 |
| Tabela 8.55. Zawartość kobaltu w minerałach występujących w chondrytach Tamdakht oraz NWA 6410 | 120 |
| Tabela 8.56. Bilans separacji minerałów zawierających kobalt. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa, k – współczynnik wzbogacania. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | 120 |
| Tabela 8.57. Uzysk stopu FeNi oraz kobaltu w procesach przeróbczych | 120 |
| Tabela 8.58. Zawartość miedzi w minerałach występujących w chondrytach Tamdakht oraz NWA 6410 | 121 |
| Tabela 8.59. Bilans separacji minerałów zawierających miedź. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa, k – współczynnik wzbogacania. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | 122 |
| Tabela 8.60. Bilans separacji minerałów zawierających siarkę. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa, k – współczynnik wzbogacania. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - | |

| | |
|---|-----|
| wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 μm , F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogeanowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | 123 |
| Tabela 8.61. Uzysk troilitu oraz siarki w procesach przeróbczych | 123 |

1. Wstęp

Pozyskiwanie surowców stoi u podstaw egzystencji każdego organizmu żywego. Bez względu czy chodzi o człowieka, kota, ptaka, termita, marchewkę czy bakterię *Escherichia Coli*, wszystkie te organizmy bezwzględnie potrzebują do podtrzymania swojego życia oraz rozwoju dostarczenia ściśle określonych surowców – pożywienia i materiałów do budowy schronienia i wychowania potomstwa. To, co odróżnia człowieka od pozostałych organizmów żywych na Ziemi to zakres pozyskiwanych surowców, który daleko wykracza poza samo pozyskiwanie żywności, chociaż to nie przedstawiciel gatunku *Homo sapiens* doszedł do tego pierwszy. Ślady kultury olduwajskiej sprzed 2 milionów lat należą do przedstawicieli *Homo habilis*, prawdopodobnie pierwszego gatunku człowieka posługującego się kamiennymi narzędziami. Ślady kultury aszelskiej będącej wytworem przedstawicieli *Homo erectus*, wykazują, że gatunek ten posługiwał się precyzyjnie obrobionymi narzędziami kamiennymi oraz ogniem. Od czasu powstania kultury olduwajskiej przez około 1,8 mln lat postęp był jednak powolny i zakres wykorzystania surowców nie zmienił się znacznie. Sytuacja zmieniła się około 200 tysięcy lat temu, gdy pojawił się nowy gatunek człowieka – *Homo sapiens sapiens*. Gatunek ten szybko zajmował nowe tereny, wypierając z nich te bardziej pierwotne. Również szybko znacznie ulepszył dokonania wcześniejszych kultur, jednak pierwsze cywilizacje powstały zaledwie około 5500 lat temu.

Nasza cywilizacja, jak i wszystkie wcześniejsze, do funkcjonowania potrzebuje bezwzględnie dwóch gałęzi gospodarki – rolnictwa oraz górnictwa. Powszechnie uznaje się, że rolnictwo ma swoje początki około 10 tysięcy lat temu. Wtedy to człowiek zaczął stopniowo zarzucać koczowniczy tryb życia na rzecz osiadłego. Nowy sposób pozyskiwania pożywienia był znacznie bardziej wydajny od zbieractwa czy polowań na dziką zwierzynę. Górnictwo jest dużo starsze od rolnictwa, jednak nie ma jednej odpowiedzi jak dużo starsze. Najstarsze ślady górnictwa na ziemiach polskich (kopalnia krzemienia) w Krzemionkach Opatowskich mają 15 tysięcy lat, natomiast najstarsza, wciąż eksploatowana kopalnia ochry Wilgie Mia w Australii może mieć nawet 40 tysięcy lat. To właśnie te dwie gałęzie gospodarki – rolnictwo i górnictwo – umożliwiły rozwój cywilizacji poprzez zapewnienie dostatecznej ilości pożywienia dla ludzi oraz dostarczenie surowców do wytwarzania narzędzi, budowy domów, świątyń, jak i wszelkich innych wytworów kultury materialnej i utrwalania niematerialnej.

Przez cały okres ziemskiej cywilizacji człowieka, od starożytności aż po dziś, wojny, bez względu na ich oficjalny powód (względy religijne, obraza majestatu władcy czy wprowadzanie demokracji, zarówno tej liberalnej jak i ludowej) toczyły się w praktyce zawsze o to samo – o surowce i dostęp do ich źródeł. Oczywiście z czasem zmieniały się surowce, o które warto było wszczynać wojny. Niegdyś było to złoto, srebro i sól, później żelazo i węgiel, teraz ropa naftowa i gaz, a w niedalekiej przyszłości może być to słodka woda. Mamy szczęście żyć w stosunkowo szczęśliwych czasach, gdy wojny nie są już codziennością większości ludzi. W krajach szeroko rozumianego zachodu zawdzięczamy to po trochu aktualnie obowiązującej doktrynie humanizmu, w której życie każdego człowieka, a także szeroko pojęty pokój są cenne. Głównego powodu utrzymującego się pokoju upatrywałbym jednak w rozwoju technologicznym. Wraz z jego rozwojem stało się możliwe pozyskiwanie dużych ilości surowców z własnych źródeł oraz sprzedawanie produktów górnictwa na światowych giełdach. Dużym zagrożeniem tego stanu rzeczy jest widmo wyczerpywania się aktualnie eksploatowanych złóż surowców.

Każde złożo surowca wcześniej czy później się wyczerpie. Nie jest to nic nadzwyczajnego – w historii Ziemi zamknięto z tego powodu niezliczoną liczbę kopalń. Poza lokalnym niezadowoleniem z uwagi na spadek dochodów i wzrost bezrobocia nie wywołuje to zwykle większych zmian globalnych. W dzisiejszych czasach zamykanie kopalń wręcz wywołuje u niektórych ludzi zadowolenie. Wynika to z globalizacji rynku surowców naturalnych – jeżeli dane państwo nie ma dostępu do określonego surowca, po prostu go kupuje na zewnątrz. Zamykanie kopalń nie wywołuje więc niepokoju wśród zwykłych ludzi, a także rządów, którym na sercu powinno leżeć zapewnienie dobrej przyszłości swoim obywatelom.

Wyczerpanie się złóż któregoś z pierwiastków na Ziemi jeszcze długo nie stanie się faktem, jednak z uwagi na wysokie koszty oraz niezbędny długi czas na przeprowadzenie odpowiednich badań, tym przyszłym problemem należy zająć się możliwie najwcześniej. W tej chwili przed widmem braku któregoś z surowców chronią nas wciąż udane poszukiwania nowych złóż surowców, często odnajdywane w pobliżu obecnie eksploatowanych. Z uwagi na postęp technologiczny, a także zmiany cen surowców, część zamkniętych kopalń może wznowić eksploatację z porzuconych złóż. Również wraz z rozwojem technologii możliwe jest wydobycie złóż zalegających głęboko pod ziemią. Kolejnym perspektywnym kierunkiem, wspieranym między innymi przez Polskę, jest wydobycie surowców z dna mórz i oceanów. Powierzchnia dna oceanicznego i morskiego kilkukrotnie przewyższa powierzchnię lądów i można spodziewać się zawartych w nich dużych zasobów. Również coraz bardziej interesującym kierunkiem dla wielkich kompanii wydobywczych stają się państwa Afryki, Azji oraz Ameryki Południowej, omijane dotąd z uwagi na dużą niestabilność polityczną, trwające wojny domowe oraz terroryzm. Bardzo duże znaczenie mają również topniejące lodowce na biegunach, co najlepiej widać w rosnącym napięciu pomiędzy państwami roszczącymi sobie prawa do tych terenów. Konflikt najmocniej zaznacza się w Arktyce, gdzie Rosjanie prowadzą wzmożone prace badawcze, mające udowodnić przynależność tych terenów do Rosji. Do zaproponowanych m.in. przez doktor Łuszczek (2011) kierunków poszukiwania surowców (potencjalne złoża ziemskie opisane w tym akapicie, oraz pas planetoid, Mars i Księżyc), należałoby z całą stanowczością dodać pozyskiwanie surowców z odpadów. Bardzo wiele cennych surowców jest traconych wraz z odpadami górnictwem oraz komunalnymi. W przypadku odpadów górniczych sprawa jest o tyle uproszczona, że są one składowane w określonym miejscu, ich skład jest znany i w przypadku udostępnienia technologii pozwalającej ekonomicznie pozyskać surowiec, rozpoczęcie eksploatacji takiego odpadu nie będzie stanowić dużego problemu. W przypadku odpadów komunalnych z uwagi na niski poziom edukacji ludzi i małe zaangażowanie władz na bardzo rozproszone wysypiska komunalne, ale również na tak zwane „dzikie wysypiska” w lasach, na polach czy przy drogach trafiają olbrzymie ilości surowca, którego pozyskanie i przetworzenie bywa często wielokrotnie tańsze niż pozyskanie w wyniku produkcji górniczej.

Ziemia ma ograniczone zasoby z czym kiedyś ludzie będą musieli się pogodzić, jednak nasza planeta jest tylko jednym z licznych obiektów we Wszechświecie. Obiekty takie jak Księżyc, Mars czy planetoidy są bogate w różnego rodzaju surowce. Co więcej, umiejętność ich pozyskiwania oraz przerobu jest potrzebna już teraz i nie jest to związane w żaden sposób z koniecznością pokrycia zapotrzebowania ziemskiego na te surowce. Człowiek zawsze pragnął zdobywać nowe obszary, zawsze robił to w związku z dostępem do zasobów. Tak było, gdy *Homo sapiens sapiens* wyruszył z Afryki na podbój świata, tak było, gdy Europejczycy wyruszyli do Ameryki, z tego samego powodu naukowcy amerykańscy i radzieccy wysyłali ludzi w kosmos i dokładnie z tego samego powodu teraz planują stałe bazy na Księżycu i Marsie, a do wyścigu dołączyła nowa potęga – Chiny. To, co wciąż wstrzymuje ekspansję

człowieka poza Ziemię to olbrzymie koszty takiego przedsięwzięcia. Misja tego typu wymaga istnienia technologii pozwalającej pozyskiwać surowce na miejscu ich zapotrzebowania, a także technologię produkcji z tych surowców niezbędnych narzędzi, elementów konstrukcyjnych czy wyposażenia kosmicznej bazy. Jest prawdopodobne, że tego typu bazy budować będą autonomiczne lub półautonomiczne maszyny sterowane przez człowieka z Ziemi. Człowiek chociażby na Księżycu to dodatkowe olbrzymie koszty związane z dostarczeniem samego człowieka, zapewnieniem mu miejsca, tlenu, wody i pożywienia. Wymaga to również jego transportu w drugą stronę. Z tego powodu można spodziewać się, że bazy takie będą budowane przez roboty. Dopiero po zbudowaniu odpowiednich baz można myśleć o kolonizacji.

Pokrywanie zapotrzebowania ziemskiego na poszczególne surowce to znacznie odleglejsza przyszłość. Wraz z rozwojem technologii pozyskiwania surowców pozaziemskich oraz ich przerobu bezpośrednio w miejscu wydobywania opłacalność transportowania tego typu surowców będzie rosła. Przeciwno dostawom surowców ze źródeł pozaziemskich bardzo długo przemawiać będą dwa, mocno ze sobą związane czynniki – transport małych ilości surowca będzie nieopłacalny, natomiast duże ilości surowca mogą spowodować znaczny przerost podaży ponad popyt, a tym samym całe przedsięwzięcie może być nieopłacalne. Te czynniki sprawiają, że regularne transporty surowców na Ziemię wydają się obecnie bardzo odległe w czasie. Aby sprowadzać surowce na Ziemię będą musiały wystąpić rosnące niedobory surowców związane z wyczerpywaniem się ich ziemskich źródeł, znaczne obniżenie kosztów transportu lub zarzucenie eksploatacji górniczej na Ziemi.

Górnictwo pozaziemskie (lub kosmiczne), które niegdyś wydawało się być głównie domeną książek i filmów z gatunku science-fiction staje się faktem. Szereg instytucji naukowych, a także prywatnych firm inwestuje miliardy dolarów w pozyskanie technologii pozwalających na badanie i eksploatację pozaziemskich zasobów. Należy jednak pamiętać, że górnictwo pozaziemskie potrzebuje nie tylko ciężkiego sprzętu urabiającego, ale również dokładnych badań pozaziemskich skał złożowych, aby wiedzieć jaki surowiec można pozyskać z jakich skał lub asocjacji mineralnych i jakimi metodami.

2. Eksploatacja surowców pozaziemskich

2.1. Podział surowców

Surowce naturalne zwyczajowo dzieli się na trzy grupy: surowce energetyczne, surowce metaliczne oraz surowce niemetaliczne. Surowce niemetaliczne można dodatkowo podzielić na surowce chemiczne, skalne, ilaste, kamienie szlachetne i ozdobne oraz różnego rodzaju wody i gazy (np. CO₂). Najważniejsze dla gospodarki surowce naturalne przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Najważniejsze surowce naturalne

| surowce energetyczne | surowce metaliczne | surowce niemetaliczne |
|--|--|---|
| węgiel kamienny węgiel brunatny torf ropa naftowa gaz ziemny uran | żelazo nikiel tytan wolfram wanad molibden kobalt cyrkon miedź cynk ołów cyna lit antymon bizmut kadm rtęć srebro złoto platyna glin magnez | surowce chemiczne (np. sole, siarka, fosforyty) surowce skalne (np. granit, bazalt, marmur, piaskowiec) surowce ilaste (np. kaolin) kamienie szlachetne i ozdobne (np. diament, rubin, szmaragd, ametyst) wody mineralne i termalne, solanki, dwutlenek węgla |

Surowce energetyczne, jak sama nazwa wskazuje, mogą być wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej, ale nie jest to ich jedyne zastosowanie. Węgiel kamienny stosowany jest również do produkcji ciepła w kotłach przemysłowych oraz w coraz mniejszym stopniu w kotłach i piecach domowych. Ponadto jest niezbędny do produkcji koksu oraz stali. Torf, poza Irlandią i Finlandią nie stanowi znaczącego źródła energii i jest wykorzystywany głównie w medycynie oraz w ogrodnictwie jako nawóz. Ropa naftowa wykorzystywana jest przede wszystkim do produkcji paliw oraz tworzyw sztucznych. Gaz ziemny również wykorzystywany jest jako paliwo w samochodach, domowych kotłach oraz coraz rzadziej w kuchenkach. Powyższe surowce energetyczne są to skały osadowe organogeniczne, tzw. paliwa kopalne. Oznacza to, że powstały one w wyniku nagromadzenia się szczątków organizmów żywych i na Ziemi znajdują się najprawdopodobniej ich jedyne złoża w Układzie Słonecznym, których zasoby w najbliższych tysiącletniach będą nieodnawialne. Ostatnim surowcem energetycznym jest uran. Oprócz produkcji energii wykorzystywany jest również do produkcji broni (Burda, 2014).

Surowce metaliczne, czyli po prostu metale, mają bardzo szerokie zastosowania. Najważniejsze to produkcja stali (żelazo, nikiel, tytan, wolfram, wanad, molibden, cynk) i innych stopów (nikiel, molibden, kobalt, miedź, cynk, cyna, antymon, bizmut, glin, magnez). Ponadto metale znajdują bardzo szerokie zastosowanie w różnych gałęziach gospodarki. Są

wykorzystywane do produkcji baterii i akumulatorów (kobalt, kadm, nikiel, ołów, lit), barwników (tytan, kobalt), broni (tytan, wolfram, molibden, ołów, arsen), półprzewodników (arsen, antymon) czy reaktorów jądrowych (wanad, kadm). Ponadto są stosowane w jubilerstwie (cyrkon, tytan, srebro, złoto, platyna), lotnictwie (tytan, molibden), czy medycynie (bismut, kadm, srebro, złoto, platyna, kobalt) (USGS, 2017).

Surowce niemetaliczne mają również bardzo szerokie zastosowanie. Surowce chemiczne są wykorzystywane m.in. w przemyśle chemicznym przy produkcji kwasów, w rolnictwie jako nawozy, czy też w przemyśle spożywczym jako dodatki do żywności. Surowce skalne mają swoje zastosowanie przede wszystkim w budownictwie oraz kamieniarstwie. Surowce ilaste są stosowane w przemyśle ceramicznym. Kamienie szlachetne i ozdobne, wykorzystywane są w jubilerstwie, a minerały o dużej twardości także jako materiał ścierny (Burda, 2014). Natomiast wody, prócz swojego zastosowania spożywczego, mogą mieć również wykorzystanie medyczne (mineralne wody lecznicze), energetyczne (wody termalne) czy też być źródłem cennych pierwiastków (solanki). Gazy, np. dwutlenek węgla są wykorzystywane w przemyśle spożywczym oraz jako gazy techniczne, np. gaśnicze.

W 2010 roku przedstawiono raport wykonany na zlecenie Komisji Unii Europejskiej dotyczący dostępności 41 surowców mineralnych o istotnym znaczeniu dla gospodarki Unii Europejskiej. Surowce te podzielono na krytyczne, strategiczne oraz deficytowe. Żelazo oraz nikiel, będące głównym obiektem zainteresowania niniejszej pracy znalazły się na liście surowców strategicznych obok renu, telluru, aluminium, boksytów, magnezytu, molibdenu, manganu, wanadu, cynku oraz chromu (Blaschke i in., 2015).

Niemal wszystkie występujące naturalnie na Ziemi surowce, od pojedynczych izotopów pierwiastków, aż po surowce zbudowane ze skomplikowanych związków chemicznych znajdują swoje praktyczne zastosowanie. Utrata możliwości pozyskiwania któregoś z surowców będzie tym dotkliwsza, im szersze zastosowanie ma dany surowiec oraz czym mniejsza jest możliwość zastosowania zamiennika. Dlatego też tak ważne jest stałe poszukiwanie nowych źródeł tych surowców zarówno na Ziemi, jak i poza nią.

2.2. Surowce pozaziemskie

Poza Ziemią praktycznie każdy obiekt jest potencjalnym źródłem surowców. Wynika to po części z bardzo szerokiego spektrum surowców jakich już w tej chwili wymaga współczesna technika, ale przede wszystkim wynika to z potrzeby tworzenia owoców tej techniki na miejscu jej wykorzystania, aby uniknąć olbrzymich kosztów związanych z ich transportem. W Układzie Słonecznym źródłem takich surowców mogą być w pierwszej kolejności Księżyc oraz obiekty bliskie Ziemi (tzw. NEO – *Near Earth Objects*). W dalszej perspektywie Mars, pas planetoid oraz księżyce planet zewnętrznych (Przylibski, 2015; Przylibski i Łuszczek, 2012).

Pomimo wielu misji badawczych, których celem były obiekty Układu Słonecznego, w dalszym ciągu najwięcej danych o pozaziemskich surowcach dostarczają nam badania meteorytów odnalezionych na Ziemi. Dzięki nim możemy stosunkowo małym kosztem oszacować zasobność surowców na niewielkich ciałach układu słonecznego pochodzących z pasa planetoid oraz obiektów bliskich Ziemi, a także w mniejszym stopniu zasobność niektórych skał na Księżycu czy Marsie. W przypadku Marsa i Księżycy, a także nielicznych innych obiektów naszego Układu Słonecznego prowadzone są również badania przy pomocy różnego rodzaju łazików i sond, są to jednak przede wszystkim badania powierzchniowe. W przypadku chondrytów badanie jedynie fragmentów ciał macierzystych niesie informację o

całej ich objętości. Skąły te, gdy powstawały, nie uległy całkowitemu przetopieniu i dyferencjacji, co objawia się w homogenicznym rozkładzie składników w całej objętości meteorytu, jak i jego ciała macierzystego. Możliwe są pewne strefy wzbogacenia w niektóre surowce metaliczne związane z kolizjami z innymi obiektami, jednak w przypadku dużych planetoid dotyczy to jedynie stosunkowo niewielkiej warstwy powierzchniowej. W przypadku innych obiektów, a zwłaszcza tych dużych jak Księżyc czy Mars badanie powierzchni daje dużo cennych informacji o potencjalnych źródłach surowców. Należy mieć jednak na uwadze, że podobnie jak na Ziemi, większość cennych złóż pierwiastków, jeżeli w ogóle występują, znajduje się prawdopodobnie pod ich powierzchnią.

Tabela 2.2. Średnia zawartość wybranych pierwiastków w skorupie ziemskiej (Wedepohl, 1995), chondrytach węglistych CI oraz w chondrytach zwyczajnych H, L i LL (McSween i Huss, 2010). Kolorem czerwonym oznaczono zawartości mniejsze niż w skorupie ziemskiej, a zielonym większe od średniej zawartości w skorupie ziemskiej.

| Pierwiastek chemiczny | Jednostka zawartości | Skorupa ziemska | CI | H | L | LL |
|-----------------------|----------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| | | | średnia | średnia | średnia | średnia |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Li | ppm | 18 | 1,5 | 1,7 | 1,85 | 1,8 |
| Be | ppb | 2 400 | 25 | 30 | 40 | 45 |
| B | ppm | 11 | 0,87 | 0,4 | 0,4 | 0,7 |
| C | % | 0,199 | 3,45 | 0,21 | 0,25 | 0,31 |
| N | ppm | 60 | 3180 | 48 | 43 | 70 |
| O | % | 47,2 | 46,4 | 35,7 | 37,7 | 40,0 |
| F | ppm | 525 | 60 | 125 | 100 | 70 |
| Na | % | 2,36 | 0,50 | 0,611 | 0,69 | 0,684 |
| Mg | | 2,20 | 9,7 | 14,1 | 14,9 | 15,3 |
| Al | | 7,98 | 0,865 | 1,06 | 1,16 | 1,18 |
| Si | | 28,8 | 10,64 | 17,1 | 18,6 | 18,9 |
| P | ppm | 757 | 950 | 1200 | 1030 | 910 |
| S | % | 0,0697 | 5,41 | 2,0 | 2,2 | 2,1 |
| Cl | ppm | 472 | 700 | 140 | 270 | 200 |
| K | | 21 400 | 550 | 780 | 920 | 880 |
| Ca | % | 3,85 | 0,926 | 1,22 | 1,33 | 1,32 |
| Sc | ppm | 16 | 5,9 | 7,8 | 8,1 | 8,0 |
| Ti | | 4010 | 440 | 630 | 670 | 680 |
| V | | 98 | 55 | 73 | 75 | 76 |
| Cr | | 126 | 2650 | 3500 | 3690 | 3680 |
| Mn | | 716 | 1940 | 2340 | 2590 | 2600 |
| Fe | % | 4,32 | 18,2 | 27,2 | 21,8 | 19,8 |
| Co | ppm | 24 | 505 | 830 | 580 | 480 |
| Ni | % | 0,0056 | 1,10 | 1,71 | 1,24 | 1,06 |
| Cu | ppm | 25 | 125 | 94 | 90 | 85 |
| Zn | | 65 | 315 | 47 | 57 | 56 |
| Ga | | 15 | 9,8 | 6,0 | 5,4 | 5,3 |
| Ge | | 1,4 | 33 | 10 | 10 | 10 |
| As | | 1,7 | 1,85 | 2,2 | 1,36 | 1,3 |
| Se | | 0,120 | 21 | 8,0 | 8,5 | 9 |
| Br | | 1,0 | 3,5 | <1 | <2 | 1,0 |
| Rb | | 78 | 2,3 | 2,3 | 2,8 | 2,2 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
|----|--------|--------|--------|------|------|------|-----|
| Sr | ppm | 333 | 7,3 | 8,8 | 2,8 | 2,2 | |
| Y | | 24 | 1,56 | 2,0 | 1,8 | 2,0 | |
| Zr | | 203 | 3,9 | 7,3 | 6,4 | 7,4 | |
| Nb | | 19 | 0,25 | 0,4 | 0,4 | b.d. | |
| Mo | | 1,1 | 0,92 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | |
| Ru | ppb | 0,1 | 710 | 1100 | 750 | b.d. | |
| Rh | | 0,06 | 140 | 210 | 155 | b.d. | |
| Pd | | 0,4 | 560 | 845 | 620 | 560 | |
| Ag | | 70 | 200 | 45 | 50 | 75 | |
| Cd | | 100 | 690 | <10 | 30 | 40 | |
| In | | 50 | 80 | <1,5 | <20 | <20 | |
| Sn | | 2 300 | 1700 | 350 | 540 | b.d. | |
| Sb | | 300 | 135 | 66 | 78 | 75 | |
| Te | | 5 | 2300 | 520 | 460 | 380 | |
| I | | 800 | 430 | 60 | 70 | b.d. | |
| Cs | | 3 400 | 190 | <200 | <500 | 150 | |
| Ba | | ppm | 584 | 2,35 | 4,4 | 4,1 | 4,0 |
| La | | ppb | 30 000 | 235 | 301 | 318 | 330 |
| Ce | 60 000 | | 620 | 763 | 970 | 880 | |
| Pr | 6 700 | | 94 | 120 | 140 | 130 | |
| Nd | 27 000 | | 460 | 581 | 700 | 650 | |
| Sm | 5 300 | | 150 | 194 | 203 | 205 | |
| Eu | 1 300 | | 57 | 74 | 80 | 78 | |
| Gd | 4 000 | | 200 | 275 | 317 | 290 | |
| Tb | 650 | | 37 | 49 | 59 | 54 | |
| Dy | 3 800 | | 250 | 305 | 372 | 360 | |
| Ho | 800 | | 56 | 74 | 89 | 82 | |
| Er | 2 100 | | 160 | 213 | 252 | 240 | |
| Tm | 300 | | 25 | 33 | 38 | 35 | |
| Yb | 2 000 | | 160 | 203 | 226 | 230 | |
| Lu | 350 | | 25 | 33 | 34 | 34 | |
| Hf | 4 900 | | 105 | 150 | 170 | 170 | |
| Ta | 1 100 | | 14 | 21 | 21 | b.d. | |
| W | 1 000 | | 93 | 164 | 138 | 115 | |
| Re | 0,4 | | 38 | 78 | 47 | 32 | |
| Os | 0,05 | | 490 | 835 | 530 | 410 | |
| Ir | 0,05 | 465 | 770 | 490 | 380 | | |
| Pt | ppm | 0,0004 | 1,0 | 1,58 | 1,09 | 0,88 | |
| Au | ppb | 2,5 | 145 | 220 | 156 | 146 | |
| Hg | | 40 | 310 | b.d. | 30 | 22 | |
| Tl | | 520 | 142 | <1 | <5 | <30 | |
| Pb | | 14 800 | 2500 | 240 | 40 | b.d. | |
| Bi | | 85 | 110 | <10 | 14 | <30 | |
| Th | | 8 500 | 29 | 38 | 42 | 47 | |
| U | | 1 700 | 8 | 13 | 15 | 15 | |

Skały chondrytowe dzięki występowaniu dużych ziaren stopu FeNi mogą być traktowane w rzeczywistości jako bogate rudy żelazowo-niklowe. W tabeli 2.2. przedstawiono średnią zawartości wybranych pierwiastków w poszczególnych grupach chondrytów zwyczajnych oraz średnią zawartość w skorupie ziemskiej. Dla średnich zawartości pierwiastków poszczególnych grup chondrytów zwyczajnych wyróżniono kolorem zielonym wartości większe o co najmniej 20%, natomiast czerwonym mniejsze o co najmniej 20% od średniej zawartości danego pierwiastka w skorupie ziemskiej. Spośród 77 uwzględnionych pierwiastków, średnia zawartość jedynie 24 przekracza założoną granicę 120% średniej zawartości w skorupie ziemskiej. Pomimo, iż część z tych pierwiastków nie jest pozyskiwana na Ziemi w procesach związanych z górnictwem, natomiast większość pochodzi ze złóż o dużej koncentracji danego pierwiastka, trudno jest sobie wyobrazić w tej chwili procesy i technologie, które będą wykorzystywane w górnictwie pozaziemskim, jak i przewidzieć zapotrzebowanie na poszczególne surowce.

Tabela 2.3. Wzbogacenie skał macierzystych chondrytów zwyczajnych w wybrane pierwiastki względem ich średniej zawartości w skorupie ziemskiej. Pogrubioną czcionką wyróżniono zawartości w skałach grup chondrytów zwyczajnych charakteryzujące się największym wzbogaceniem wybranego pierwiastka względem średniej zawartości w skorupie ziemskiej.

| Pierwiastek | H | L | LL |
|--------------------|---------------|-------------|-------------|
| Osm | 16 700 | 10 600 | 8 200 |
| Iryd | 15 400 | 9 800 | 7 600 |
| Ruten | 11 000 | 7 500 | b.d. |
| Rod | 3 500 | 2 583 | b.d. |
| Pallad | 2 112 | 1 550 | 1 400 |
| Platyna | 395 | 272 | 220 |
| Nikiel | 305 | 221 | 189 |
| Ren | 195 | 118 | 80,0 |
| Tellur | 104 | 92,0 | 76,0 |
| Złoto | 88,0 | 62,4 | 58,4 |
| Selen | 67,7 | 70,8 | 75,0 |
| Kobalt | 34,6 | 24,2 | 20,0 |
| Siarka | 28,7 | 31,6 | 30,1 |
| Chrom | 27,8 | 29,3 | 29,2 |
| German | 7,14 | 7,14 | 7,14 |
| Magnez | 6,41 | 6,77 | 6,95 |
| Żelazo | 6,30 | 5,05 | 4,58 |
| Miedź | 3,76 | 3,60 | 3,40 |
| Mangan | 3,27 | 3,62 | 3,63 |
| Brom | 1,00 | 2,00 | 1,00 |
| Fosfor | 1,59 | 1,36 | 1,20 |
| Węgiel | 1,06 | 1,26 | 1,56 |
| Arsen | 1,29 | 0,80 | 0,76 |
| Molibden | 1,27 | 1,09 | 1,00 |

W tabeli 2.3. przedstawiono średnie wzbogacenie skał macierzystych chondrytów zwyczajnych względem średniej zawartości tych składników w skorupie ziemskiej. Planetoidy macierzyste chondrytów zwyczajnych mogą stać się źródłem uwzględnionych w tabeli 2.3. cennych pierwiastków, które mogą być pozyskiwane przy okazji wydobycia żelaza i niklu.

Tabela 2.4. Średnie wzbogacenie ciał macierzystych względem skorupy ziemskiej wśród grup meteorytów o największej zawartości wybranych pierwiastków (McSween i Huss, 2010)

| Pierwiastek chemiczny | Grupa meteorytów | Wzbogacenie | Pierwiastek chemiczny | Grupa meteorytów | Wzbogacenie |
|-----------------------|------------------|-------------|-----------------------|------------------|-------------|
| Ir | IVB | 360 000 | Fe | CH | 8,80 |
| Os | CH | 23 000 | Hg | CI | 7,75 |
| Ru | CH | 16 000 | Cd | EH | 7,05 |
| Re | IVB | 5 375 | Mn | EUC/HOW | 6,06 |
| Pt | CH | 4 250 | Zn | CI | 4,85 |
| Rh | H | 3 500 | Ga | IAB | 4,24 |
| Ni | IVB | 3 071 | Ag | EH | 4,00 |
| Pd | H | 2 112 | Br | CI | 3,50 |
| Au | IAB | 700 | P | EH | 2,81 |
| Te | EH | 480 | Sc | ANG | 2,25 |
| Co | IVB | 317 | As | EH | 2,06 |
| S | IIAB | 244 | Ca | ANG | 2,01 |
| Se | EH | 208 | In | EH | 1,70 |
| Ge | IAB | 176 | Mo | CV | 1,64 |
| Cr | DIO | 131 | Cl | CI | 1,48 |
| N | CI | 53,0 | Sb | WIN | 1,30 |
| C | CI | 17,3 | Bi | CI | 1,29 |
| Mg | AUB | 10,6 | Ti | ANG | 1,10 |
| Cu | IAB | 9,36 | | | |

W tabeli 2.4. dla wybranych pierwiastków przedstawiono grupy meteorytów, których ciała macierzyste mogłyby być ich najlepszym źródłem z uwagi na ich największą zawartość. W zestawieniu tym występują jedynie chondryty zwyczajne H jako najbogatsze potencjalne źródło rodu oraz palladu. W tabeli tej również widać, że planetoidy będące ciałami macierzystymi wszystkich klas meteorytów są potencjalnym źródłem surowców.

W przypadku Księżyca cennym źródłem informacji o zawartości pierwiastków w skałach są meteoryty pochodzenia księżycowego, ale przede wszystkim próbki skał księżycowych dostarczone bezpośrednio z Księżyca w ramach misji Apollo.

W tabeli 2.5 przedstawiono zawartości wybranych pierwiastków w skałach księżycowych zestawione ze średnią zawartością tych pierwiastków w skorupie ziemskiej. Na podstawie tych danych można wnioskować, że Księżyc nie będzie najlepszym źródłem cyny, skandiu, bizmutu, cynku, tantalu czy cezu, jednak może być źródłem wielu innych pierwiastków. Ponadto należy pamiętać, że w zestawieniu tym ujęto wyniki analiz skał dostarczonych przez misję Apollo. Są to przede wszystkim skały powierzchniowe pochodzące ze stosunkowo niewielkiego obszaru Księżyca. Wiele bogactw może kryć się głębiej pod powierzchnią Księżyca. Szczególnym zainteresowaniem otoczony jest księżycowy regolit, ponieważ w jego wolnych przestrzeniach gromadzi się Hel-3, będący potencjalnym surowcem energetycznym.

W przypadku Marsa, głównym źródłem informacji o ewentualnych źródłach surowców są badania składu mineralnego i pierwiastkowego marsjańskich meteorytów: shergottytów, nakhlitów oraz chassignitów. Jednak w przypadku Marsa jeszcze większe znaczenie ma bardzo małe rozpoznanie zasobów pod jego powierzchnią. W przypadku dużych obiektów, jak właśnie Mars, Księżyc czy księżyce innych planet, które zostały ukształtowane na drodze licznych

procesów geologicznych, badanie pojedynczych skał, jak meteoryty z nich pochodzące są cenne naukowo, jednak mają bardzo małe znaczenie dla rozpoznania ewentualnych złóż surowców i ich zasobów na takim ciele.

Tabela 2.5. Zawartość poszczególnych pierwiastków w skałach księżycowych (Ebihara i in., 1992) w porównaniu do średniej zawartości tych pierwiastków w skorupie ziemskiej

| Pierwiastek chemiczny | Jednostka zawartości | Średnia zawartość w skorupie ziemskiej | Zakres zawartości w skałach księżycowych |
|-----------------------|----------------------|--|--|
| Ir | ppb | 0,05 | 0,004 – 61,3 |
| Os | ppb | 0,05 | 0,031 – 62,9 |
| Re | ppb | 0,4 | 0,0017 – 5,82 |
| Au | ppb | 2,5 | <0,0025 – 38,8 |
| Pd | ppb | 0,4 | 0,32 – 96,7 |
| Ni | ppm | 56 | <1,22 – 2520 |
| Sb | ppb | 300 | 0,044 – 526 |
| Ge | ppb | 1 400 | 0,366 – 3550 |
| Sn | ppm | 2,3 | 0,078 – <2.2 |
| Sc | ppb | 16 000 | 0,75 – 1750 |
| Te | ppb | 5 | <0,73 – 176 |
| Ag | ppb | 70 | 0,16 – 1630 |
| In | ppb | 50 | <0,026 – 1280 |
| Bi | ppb | 85 | 0,088 – 24,7 |
| Zn | ppm | 65 | 0,168 – 53 |
| Cd | ppb | 100 | 0,70 – 1574 |
| Tl | ppb | 520 | 0,005 – 406 |
| Rb | ppm | 78 | 0,02 – 170 |
| Cs | ppb | 3 400 | 1,17 – 1665 |
| U | ppb | 1 700 | 0,927 – 6550 |

Należy mieć na uwadze, że budowa obiektów krążących wokół Słońca nie jest jednakowa. Wszystkie te obiekty, mimo że powstawały w podobnym czasie – powstawały w różnych warunkach. Dodatkowo przez kilka miliardów lat ich istnienia obiekty te były poddawane kolejnym procesom. Ziemskie złoża surowców tworzyły się dzięki wielu specyficznym procesom, które nie zachodziły na innych planetach (Taylor i McLennan, 2009).

2.3. Proponowane technologie i techniki eksploatacji

Eksploatacja zasobów pozaziemskich będzie znacznie różnić się w stosunku do eksploatacji na Ziemi. W przypadku małych ciał, jak planetoidy, czy niewielkie księżyce problemem jest brak lub bardzo mała grawitacja. Są to również ekstremalne temperatury o bardzo dużych wahaniach, brak atmosfery czy promieniowanie kosmiczne. Warunki te mają ogromny wpływ na technologie eksploatacji, a pierwszym problemem w przypadku planetoid jest już zakotwiczenie niezbędnego sprzętu.

Systemy kotwiące, aby były skuteczne, muszą spełniać kilka warunków. Przede wszystkim elementy kotwiczące muszą reagować na wszelkie siły i momenty wywołane ruchem elementów roboczych maszyny urabiającej. Z uwagi na niewielki poziom rozpoznania właściwości podłoża konieczne jest, aby system kotwiczenia był zdalny do użytku w jak największym zakresie typów podłoża. System taki musi również umożliwiać uwolnienie

maszyny urabiającej od powierzchni, a dodatkowo być wielokrotnego użytku, lub też być wystarczająco lekki i prosty, aby móc wyposażyć sprzęt w kilka jego zestawów (Badescu, 2013).

Znanych jest kilka metod kotwiczenia: silniki sterujące (z uwagi na zużycie paliwa jedynie do kotwiczenia chwilowego, np. jako pomoc przy kotwiczeniu właściwym), koła reakcyjne (równoważą siły powstałe w wyniku ruchu część roboczej), pęd statku (system kotwiczący uderza w powierzchnię z prędkością nadaną przez statek), chwytak (kotwiczenie jedynie w skałach), harpun (kotwiczenie jedynie w materiale luźnym), świder (wkręcenie świdra w powierzchnię), układ przeciwstawny (wiercenie pod kątem skośnym do powierzchni), układ płynny (wstrzykiwany jest płyn pod podnózek, który następnie twardnieje), *envelopment* (przywiązanie do obiektu linami, lub okrążenie go siatką), kotwiczenie magnetyczne (tylko w przypadku powierzchni ferromagnetycznych) (Badescu, 2013). Przedstawione warunki, które muszą spełniać systemy kotwiące mają swoje silne uzasadnienie ekonomiczne. Również kwestie ekonomiczne, wśród których najważniejszy jest koszt transportu sprzętu z Ziemi, mają wpływ na wybór metody kotwiczenia. Wraz z uzyskaniem możliwości tworzenia sprzętu i jego elementów na miejscu jego wykorzystania, ekonomia może zacząć preferować zupełnie inne rozwiązania.

Po odpowiednim zakotwiczeniu maszyn będzie można przejść do kolejnego etapu – urabiania skał złożowych. Znanych jest kilka metod urabiania skał na planetoidach, jednak metody te są przeznaczone do celów badawczych – służą do pobierania niewielkich próbek, a główny nacisk w tej technologii kładzie się na zachowanie próbki w stanie jak najbardziej zbliżonym do naturalnego. Maszyny, które doczekały się swoich prototypów służą natomiast głównie do zbierania luźnego regolitu lub skał o małej zwięzłości. Przykładem udanego prototypu jest RASSOR (*Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot*), za pomocą którego można załadować regolit, przewieźć go w wyznaczone miejsce i wyładować. Część prototypów okazało się jednak w czasie testów wadliwa. RASSOR jest jednak sprzętem niewielkim, o małej mocy przerobowej. Oznacza to, że sprzęt górniczy służący do eksploatacji złóż pozaziemskich w dalszym ciągu pozostaje głównie na etapie projektów koncepcyjnych. Jedną z ciekawszych koncepcji pozyskiwania surowców pozaziemskich jest system urabiania regolitu pneumatycznie w obiegu zamkniętym. Jest to projekt, który doczekał się swojego sprawnego prototypu, aczkolwiek możliwe jest urabianie jedynie drobnych ziaren regolitu (Badescu, 2013). Wiele prac poświęconych jest potencjalnej eksploatacji wody na Marsie oraz na Księżycu. Warte podkreślenia są prace polskich naukowców, m.in. System ISRU do pozyskiwania wody na Marsie (Wasilewski, 2018) oraz system ekstrakcji termicznej wody na Księżycu (Wasilewski, 2021). Wspomnieć należy również o sondzie "kret" skonstruowanej przez polską firmę Astronika, która miała za zadanie pobranie próbek marsjańskiego gruntu w ramach misji łazika InSight. Niestety właściwości gleby w miejscu wykonywania misji uniemożliwiły pobranie tych próbek (Wiśniewski i in., 2022).

Pozyskiwanie konkretnych surowców z urobionych skał pozaziemskich jest dużym wyzwaniem. Testy, jeżeli są w ogóle przeprowadzane, to w skali laboratoryjnej na Ziemi. Przy planowaniu eksploatacji poza Ziemią należy wziąć pod uwagę, że wszystkie te procesy odbywać się będą w warunkach małej grawitacji, przy bardzo małym ciśnieniu, bez łatwego dostępu do wody. W związku z tym wiele powszechnie wykorzystywanych procesów na Ziemi może być niemożliwe lub skomplikowane do zastosowania poza Ziemią. Eisele (2001) proponuje użycie metod wykorzystujących właściwości elektryczne, magnetyczne oraz wytrzymałościowe interesujących nas składników skał. Metody te w założeniu mogą być zastosowane w warunkach, jakie panują poza Ziemią. Do pozyskiwania surowców

proponowane są również niespotykane na Ziemi metody. Przykładem mogą być procesy elektrochemiczne przy udziale których możliwe jest pozyskiwanie jednocześnie tlenu oraz metali poprzez redukcję regolitu (Lomax i in., 2020).

3. Procesy wzbogacania i przeróbki

3.1. Wstęp

W tradycyjnym, ziemskim górnictwie metali po wydobyciu ruda jest poddawana wielu procesom, których celem jest uzyskanie jak najczystszy produktu końcowego. Jest to tak zwana metalurgia ekstrakcyjna. Dzieli się ona na mineralurgię oraz metalurgię. Procesami mineralurgicznymi są: rozdrabnianie, przesiewanie oraz wzbogacanie poprzez szereg procesów separacji. Końcowym produktem procesów mineralurgicznych jest koncentrat, zawierający znacznie większą zawartość oczekiwanego pierwiastka w stosunku do nadawy, a także często pozbawiony składników utrudniających czy też uniemożliwiających dalsze procesy. Koncentrat taki poddawany jest następnie procesom metalurgicznym (np. wytopianiu, ługowaniu, elektrolizie), w wyniku czego powstaje produkt końcowy – metal (Drzymała, 2001). Pod tym względem górnictwo pozaziemskie nie będzie różnić się wiele od ziemskiego. Pozaziemskie złoża metali nie są to czyste nagromadzenia pierwiastków. Nawet meteoryty żelazne, względem których snuje się oczekiwania jako mało skomplikowane źródło tego pierwiastka są w rzeczywistości stopami wielu metali, głównie żelaza, niklu, kobaltu i miedzi. Ponadto mogą zawierać znaczne domieszki irydu, złota, galu, germanu oraz renu. Co więcej, część metalu może występować w nich w formie siarczków (McSween i Huss, 2010). Oznacza to, że prócz metod oraz maszyn niezbędnych do wydobycia pozaziemskich skał złożowych niezbędne jest również opracowanie metod i aparatury do przerobienia tych skał.

Pierwszym procesem przeróbczym jest rozdrobnienie interesującej nas skały rudonośnej, czyli zmniejszenie wielkości ziaren. Rozmiar jest jedyną w pełni modyfikowalną cechą ziarna (Drzymała, 2001). Można dokonać tego w sposób mechaniczny (np. łamanie, ścieranie, miażdżenie, szok termiczny) lub chemiczny (np. rozpuszczanie, spalanie). Jest to proces konieczny w celu uwolnienia ziaren minerałów użytecznych. Rozdrabnianie ziaren dokonuje się poprzez dwa procesy: kruszenie oraz mielenie. Z uwagi na wysoką energochłonność procesu rozdrabniania, konieczny jest dobór możliwie efektywnej metody, zapewniającej przy możliwie małym koszcie uzyskanie produktu o optymalnej wielkości ziarna. Ziarna grube oraz bardzo drobne zwykle ulegają separacji gorzej, dlatego ważne jest, aby mielenie nie było zbyt głębokie. Każda metoda separacji jest możliwa do zastosowania tylko dla pewnego zakresu średnicy ziaren. Metody separacji niewykorzystujące medium płynnego wymagają zwykle ziaren nadawy większych niż 100 μm , natomiast „na mokro” w niektórych metodach mogą być wzbogacane nawet ziarna o średnicy 1 μm . W sytuacji, gdy skałę budują ziarna mineralne różniące się podatnością na rozdrabnianie, proces ten poszerzony o przesiewanie może być jednocześnie procesem wzbogacania (Drzymała, 2001). Przy potencjalnej eksploatacji górniczej ciał macierzystych chondrytów zwyczajnych dużym ułatwieniem przynajmniej na początku projektu górniczego, będzie obecność już częściowo rozdrobnionego materiału na powierzchni planetoid – regolitu.

Przesiewanie (klasyfikacja mechaniczna) jest procesem separacji ziaren na podstawie ich wielkości. Proces ten zachodzi na sitach. Sita, w zależności na ich użytą ilość, dzielą nadawę na dwie lub więcej frakcji (Drzymała, 2001). Przesiewanie jest zwykle ostatnim procesem przeróbczym w górnictwie kruszyw, pozwalając uzyskać różne produkty handlowe. W przypadku rud metali przesiewanie jest ostatnim procesem przygotowującym nadawę do wzbogacania. Ziarna o odpowiednim rozmiarze są kierowane do następnego etapu przeróbki. Ziarna zbyt duże są zawracane do ponownego skruszenia lub/i zmielenia, natomiast ziarna zbyt

małe mogą zostać skierowane do alternatywnego procesu wzbogacania bądź też jako odpad trafić na miejsce składowania. W przypadku wykorzystania procesu rozdrabniania i przesiewania jako procesów wzbogacania, odpowiedni produkt (klasa ziarnowa) separacji jest koncentratem.

Ostatnim etapem procesów mineralurgicznych przy pozyskiwaniu metali, jest wzbogacanie, czyli zwiększenie udziału składnika użytecznego w koncentracie. Istnieje wiele metod wzbogacania rud, a ich podział opiera się na właściwościach ziaren umożliwiających ich separację. Te cechy to: gęstość ziarna (separacja w cieczach ciężkich), stratyfikacja (separacja w cienkiej strudze cieczy), hydrofobowość (flotacja), adsorpcja (koagulacja), akwaolejofilność (aglomeracja olejowa), podatność magnetyczna (separacja magnetyczna), stała dielektryczna (separacja dielektryczna), ładunek elektryczny (separacja elektryczna) oraz przewodnictwo elektryczne (separacja w prądach wirowych). Hydrofobowość, akwaolejofilność, ładunek elektryczny oraz wskaźnik koagulacji są cechami częściowo modyfikowalnymi (Drzymała, 2001). Przy rozważanej w niniejszej pracy separacji ziaren stopu żelazowo-niklowego można wykorzystać mniejszą podatność na rozdrabnianie ziaren metalicznych niż krzemianowych (separacja przez rozdrabnianie), większą gęstość i wielkość ziaren metalicznych (separacja w cienkiej strudze cieczy oraz separacja grawitacyjna w cieczach ciężkich), podatność magnetyczną ziaren metalicznych (separacja magnetyczna), przewodnictwo elektryczne (separacja w prądach wirowych), stałą dielektryczną (separacja dielektryczna), ładunek elektryczny (separacja elektryczna) oraz hydrofobowość (flotacja). Z uwagi na rodzaj materiału oraz docelowe miejsce jego pozyskiwania najkorzystniejsze byłoby stosowanie metod nie wymagających medium płynnego (suche separacje magnetyczne, separacje elektrostatyczne). W przypadku separacji z udziałem medium płynnego dodatkowym problemem jest mała podatność stopu żelazowo-niklowego na kruszenie, co skutkuje obecnością ich dużych ziaren w nadawie. Z tego powodu również mało efektywne mogą być: hydrocyklony, stoły Mozley'a, flotacja oraz flokulacja.

Możliwość selektywnego pozyskiwania minerałów ze skał rudnych jest podstawowym warunkiem przy rozważaniu rozpoczęcia eksploatacji górniczej. Zdecydowana większość procesów znanych i wykorzystywanych na Ziemi wymaga zapewnienia płynnego medium i/lub siły grawitacji. Poza Ziemią przyszli górnicy prawdopodobnie będą musieli się zmierzyć z brakiem lub znacznie ograniczonymi zasobami płynów roboczych a także słabą grawitacją. Częściowo problem ten można rozwiązać wykorzystując siły odśrodkowe. Prawdopodobnie problemem będzie również dostarczenie odpowiedniej ilości energii do przeprowadzenia tych procesów. Z uwagi na te ograniczenia, a także konieczność zapewnienia możliwie małego kosztu pozyskiwania surowców pozaziemskich konieczne będzie opracowanie technologii pozwalających usunąć jak największą część minerałów skały płonnej w jak najwcześniejszym etapie przeróbki wydobytej kopaliny. Należy mieć także na uwadze, że w sytuacji chęci pozyskania więcej niż jednego minerału z danej rudy potrzebne mogą być zupełnie inne, czasem wykluczające się wzajemnie procesy. Dodatkowe problemy mogą być związane z dużą ilością żużlu produkowaną w procesach metalurgicznych, a także z reaktywnością rudy, która powstała w warunkach redukcyjnych (Eisele, 2001). Należy jednak zdecydowanie podkreślić, że nie wyklucza to jednoznacznie możliwości wykorzystania technologii już nam znanych i stosowanych na Ziemi. Ponadto nie wyklucza to stosowania tych metod na Ziemi w celach badawczych. Cechą nauki nie jest porzucanie projektów z uwagi na trudności, tylko poszukiwanie rozwiązań dla istniejących lub potencjalnych problemów. Dzięki selektywnemu rozdziałowi składników mineralnych rud chondrytowych możliwe jest jeszcze dokładniejsze określenie potencjalnych zasobów ich ciał macierzystych.

3.2. Klasyfikacja hydrauliczna

W separacji hydraulicznej ziaren mineralnych wykorzystuje się różnice w prędkości ich opadania, która zależy od gęstości ziarna, jego średnicy a także oporu medium, w którym porusza się ziarno (Drzymała, 2001). Metodę tę zwykle stosuje się do szeroko pojętej regulacji zawartości ziaren o danych rozmiarach w nadawie (np. odszlamianie, dzielenie na klasy ziarnowe), jednak w niektórych sytuacjach można użyć jej również do wzbogacania.

Najprostszą metodą klasyfikacji hydraulicznej jest klasyfikacja sedymentacyjna, w której podstawą rozdziału ziaren jest prędkość ich opadania w medium. Ciekawą metodą klasyfikacji hydraulicznej godną wspomnienia jest klasyfikacja fluidyzacyjna. W zbiorniku klasyfikatora, w którym znajduje się nadawa od dołu doprowadzany jest strumień medium, np. woda. Jeżeli prędkość sedymentacji ziaren jest mniejsza niż prędkość przepływu wody, są one unoszone wraz z nią i trafiają do przelewu. Natomiast ziarna o większej prędkości sedymentacji trafiają do wylewu na dnie zbiornika. Separacja taka powinna dzielić nadawę na dwa produkty o ziarnie podziałowym d_{50} , którego prędkość sedymentacji jest równoważona siłą wypierania strumienia wody. Nie jest jednak możliwe osiągnięcie ostrej granicy podziału z uwagi na niemożliwość utrzymania przez cały czas trwania klasyfikacji przepływu laminarnego wody (Drzymała, 2001).

Ciekawym rozwiązaniem jest klasyfikacja w hydrocyklonie. W urządzeniach tych medium porusza się spiralnie, a główną siłą separującą jest siła odśrodkowa. Budowa hydrocyklonów sprawia, że tworzą się dwa, poruszające się strumienie medium. Najbardziej zewnętrzny strumień (struga) niesie ze sobą ziarna ciężkie, które trafiają do wylewu na dnie zbiornika. Natomiast ziarna lekkie, ulegające w mniejszym stopniu sile odśrodkowej, są niesione strumieniem wewnętrznym w górę urządzenia do przelewu (Drzymała, 2001).

Klasyfikacja hydrauliczna rud pozaziemskich, w tym rud chondrytowych, nie jest wykluczona. Składniki rozpatrywanej nadawy znacznie różnią się gęstością: minerały stopu FeNi – 7,8 - 8,3 g/cm³, troilit (FeS) – 4,67 g/cm³, oliwiny – 3,22 - 4,39 g/cm³, pirokseny – 2,86 - 3,96 g/cm³ oraz plagioklasy – 2,50 - 2,76 g/cm³ (Manecki, 2004). Największym problemem przy tego typu metodach jest konieczność zachowania stałości składu nadawy oraz trudność z dopasowaniem parametrów klasyfikacji. Dodatkową trudnością jest także czystość (dokładność) separacji ziaren monomineralnych w nadawie – zwykle ziarna będą składały się z kilku (co najmniej dwóch) faz mineralnych, ze względu na bardzo drobnokrystaliczną strukturę chondrytów i ich składników strukturalnych – m.in. chondr, ich fragmentów oraz ziaren FeNi zrosniętych z FeS, oraz matrix.

3.3. Separacja w cienkiej strudze cieczy

Separacja w cienkiej strudze cieczy pod wieloma względami przypomina klasyfikację hydrauliczną. Tutaj również kluczową rolę odgrywa gęstość oraz rozmiar ziaren, a dodatkowo także kształt ziaren i ich współczynnik tarcia o powierzchnię separatora. Zwykle minerały złożowe charakteryzują się większą gęstością od minerałów budujących skałę płonną, w związku z czym przy porównywalnych rozmiarach są cięższe (szybciej sedymentują) i napotykają na większy opór w wyniku tarcia (Drzymała, 2001).

Najstarszą stosowaną metodą wzbogacania jest separacja strumieniowa, znana chociażby z czerpania złota. Najprostszym separatorem strumieniowym może być pochylona rynienka z otworami w dnie, przez które przedostają się ziarna ciężkie, natomiast na końcu

rynienki przez przelew usuwane są ziarna lżejsze. Istnieje wiele typów separatorów wykorzystujących ten sposób rozdzielania składników nadawy, np. stożki separujące Reicherta, separatory strumieniowo-zwojowe oraz stoły koncentracyjne (Drzymała, 2001).

Stoły koncentracyjne, dzięki zdolności ziaren nadawy do wachlarzowego rozptyływania się po ich powierzchni zgodnie ze wzrastającą gęstością, umożliwiają stosunkowo prostą separację różnych frakcji. Nie jest to jednak metoda wydajna (Drzymała, 2001). W przypadku rudy chondrytowej możliwe byłoby uzyskanie dwóch koncentratów: wzbogaconego o minerały stopu FeNi, wzbogaconego o troilit i być może chromit oraz odpad, w którym znajdowałyby się głównie krzemiany.

3.4. Separacja w cieczach ciężkich

W separacji w cieczach ciężkich (czy też w wodzie) wykorzystuje się różnice w gęstości składników nadawy. Składniki nadawy o gęstości większej niż ciecz sedymentują, o gęstości mniejszej unoszą się na powierzchni, natomiast o gęstości identycznej są zawieszane w tej cieczy. Ciecze ciężkie dzieli się na jednorodne (najczęściej są to roztwory wodne soli, rzadziej ciecze organiczne), zawiesinowe oraz magnetyczne. Dobierana do separacji ciecz ciężka, prócz odpowiedniej gęstości, nie powinna reagować z występującymi w nadawie minerałami (Drzymała, 2001).

Dla rudy chondrytowej gęstość cieczy ciężkiej powinna przekraczać $4,5 \text{ g/cm}^3$ w przypadku chęci oddzielenia minerałów FeNi oraz FeS i Cr_2O_3 od krzemianów lub co najmniej 5 g/cm^3 , jeżeli w koncentracie miałyby się znaleźć głównie minerały FeNi. Dla cieczy jednofazowych górną granicą jest ciecz Clericiego mająca gęstość $4,24 \text{ g/cm}^3$ (Kusiak i Paszkowski, 1998), co oznacza, że tego typu ciecze nie są brane pod uwagę. Także ciecze magnetyczne, których pozorną gęstość można regulować przy pomocy natężenia pola magnetycznego nie są brane pod uwagę z uwagi na magnetyczne właściwości stopu FeNi.

Różnorodność minerałów (ich właściwości fizycznych i chemicznych) występujących w potencjalnej chondrytowej rudzie metali jest ogromnym problemem przy doborze odpowiedniej cieczy ciężkiej. Zwłaszcza, że w nadawie występują ziarna polimineralne.

3.5. Separacja magnetyczna

W separacji magnetycznej decydującą cechą minerałów przy ich rozdziale jest podatność magnetyczna. Minerały o dodatniej podatności magnetycznej (paramagnetyki) są przyciągane do pola magnetycznego, natomiast te o ujemnej podatności (diamagnetyki) – odpychane przez pole magnetyczne. Jeżeli minerały w nadawie różnią się wartością podatności magnetycznej, możliwa jest ich separacja. W przypadku separacji różnych paramagnetyków stosunek ich podatności magnetycznej powinien wynosić co najmniej 20:1 (Drzymała, 2001).

Istnieje kilka rodzajów separatorów magnetycznych. Najprostszym są separatory ferromagnetyczne wykorzystujące magnesy średniej mocy, które w praktyce są w stanie odseparować jedynie ziarna silnie ferromagnetyczne (np. kamacyt). Kolejnym typem są separatory magnetyczne z otwartym gradientem. Wykorzystując odpowiednio silne magnesy możliwe jest separowanie ziaren paramagnetycznych. Separatory o dużym gradiencie również mogą być wykorzystane do separacji ziaren paramagnetycznych, jednak ich potencjalną wadą w wykorzystaniu pozaziemskim jest konieczność wykorzystania płynów do transportu nadawy, a także czyszczenia. Ostatnia metoda to fluidyzacja magnetyczna. Metoda ta wykorzystuje

szybko zmieniające się pole magnetyczne, w którym cząsteczki doświadczają momentu obrotowego proporcjonalnego do ich podatności magnetycznej. Ziarna wprowadzone w ruch obrotowy zaczynają zachowywać się jak płyn, gdy ziarna o małej podatności magnetycznej pozostają nieruchome. Metoda ta jest bardziej selektywna od powszechnie wykorzystywanych i daje możliwość rozdzielania ziaren na podstawie niewielkich różnic podatności magnetycznej (Eisele, 2001).

W przypadku rudy chondrytowej, oczekiwany koncentrat powinien być maksymalnie wzbogacony w minerały stopu FeNi. Dodatkowo pozaziemski siarczek żelaza FeS – troilit, w odróżnieniu do jego ziemskiej wersji – pirotynu, jest niemagnetyczny (Eakle, 1922). W teorii separacja magnetyczna powinna więc przebiegać dość łatwo, jednak w rzeczywistości chondrytowe oliwiny i pirokseny są zwykle bogate w żelazo, ponadto w chondrach krzemianowych występują liczne, bardzo drobne ziarna minerałów FeNi. Wtrącenia te będą oddziaływały z polem magnetycznym i tym samym powodowały zubożenie koncentratu krzemianami. Dodatkowo oliwiny, pirokseny oraz chromit są paramagnetykami (Gierlotka, 2019).

3.6. Separacja z wykorzystaniem indukcji elektromagnetycznej

Wykorzystując zmienne pole magnetyczne możliwe jest indukowanie prądu elektrycznego w ziarnach o wysokim przewodnictwie, np. ziarnach metalicznych. Naładowane cząsteczki są odpychane przez pole magnetyczne, natomiast cząsteczki nieposiadające właściwości przewodzących nie reagują z polem magnetycznym. Efektywność tej metody separacji zależy od przewodności ziarna, szybkości zmiany pola magnetycznego oraz wielkości ziarna (Eisele, 2001).

Dużą zaletą tej metody jest brak konieczności wykorzystania płynu roboczego, a potrzebę wykorzystania siły grawitacji można ograniczyć wykorzystując odpowiednio dobrany mechanizm dostarczania nadawy (Eisele, 2001).

3.7. Separacja z wykorzystaniem prądów wirowych

Przy wykorzystaniu prądów wirowych możliwa jest separacja minerałów przewodzących prąd (przewodników) od minerałów nieprzewodzących prądu (dielektryków) w zmiennym polu magnetycznym dzięki sile Lorentza. Typowy separator zbudowany jest z przenośnika taśmowego, w którym przy wysypie jest zamontowany specjalny bęben pokryty magnesami. Bęben ten porusza się szybciej niż taśma indukując prądy wirowe w przewodnikach prądu. W efekcie dielektryki spadają tuż za kończącym się przenośnikiem taśmowym, podczas gdy minerały przewodzące prąd spadają znacznie dalej (Drzymała, 2001). Tego typu separatory z powodzeniem mogłyby być wykorzystywane poza Ziemią. Wymagałoby to pewnych modyfikacji w mechanizmie podawania nadawy. W warunkach próżni wykorzystano tą metodę w separacji ilmenitu z księżycowego regolitu (Eisele, 2001).

Elementami dielektrycznymi rudy chondrytowej są zdecydowanie krzemiany: oliwiny (rezystywność $10^5 \Omega\text{m}$) oraz skalenie ($10^{11} - 10^{12} \Omega\text{m}$) (Gierlotka, 2019). Natomiast czyste metale są z reguły dobrymi przewodnikami. Dla przykładu rezystywność żelaza wynosi $10^{-9} \Omega\text{m}$ (Serway, 1998).

Podobnie jak w przypadku separacji magnetycznej wzbogacanie rudy żelaza może być problematyczne z uwagi na małych rozmiarów ziarna minerałów FeNi występujących w

krzemianowych chondrach. Może to powodować zubożanie koncentratu o takie właśnie chondry. Ponadto minerałami poddającymi się tego typu separacji byłyby także chromit oraz troilit. Należy jednak zwrócić uwagę na stosunkowo duże możliwości zastosowania metody poza Ziemią z uwagi na brak potrzeby wykorzystania płynów roboczych i, po odpowiednich modyfikacjach, siły grawitacji.

3.8. Separacja elektryczna

Podstawą separacji elektrycznej jest możliwość gromadzenia ładunku elektrycznego na powierzchni ziarna oraz brak możliwości jego dłuższego utrzymania przez przewodniki. Dzięki temu w polu elektrycznym możliwy jest rozdział przewodników od dielektryków. Ładunek na powierzchni ziarna można wytworzyć poprzez pocieranie, jonizację, indukcję oraz kontakt z powierzchnią naładowaną elektrycznie. Separacja natomiast odbywać może się w powietrzu w polu elektrycznym lub/i na naładowanej powierzchni (Drzymała, 2001).

W warunkach ziemskich wykorzystanie separacji elektrycznej często wiąże się z potrzebą wykorzystania również siły grawitacji. Jednak np. elektryczny separator siatkowo-taśmowy powinien równie dobrze pracować w warunkach małej grawitacji. Taśma w tym separatorze wykonana jest z siatki o otworach do 10 razy większych niż ziarna nadawy. W czasie, gdy cząstki poruszają się i ocierają o siebie nawzajem oraz o taśmę zostają naelektryzowane i w konsekwencji przyciągane przez elektrody o przeciwnym ładunku, a następnie są usuwane z separatora. Metoda ta jest wykorzystywana np. do usuwania pirytu z węgla kamiennego (Eisele, 2001). Niewątpliwą zaletą tej metody jest możliwość prowadzenia separacji bez udziału grawitacji oraz płynów roboczych.

W metodzie tej, w odróżnieniu od separacji z wykorzystaniem prądów wirowych, wykorzystywane są tylko właściwości powierzchniowe ziaren. Oznacza to, że teoretycznie istnieje możliwość bardziej selektywnej separacji ziaren FeNi, ponieważ drobne ziarna stopu FeNi w krzemianach nie powinny znacząco wpływać na gromadzący się na ich powierzchni ładunek.

3.9. Flotacja

Separacja na drodze flotacji opiera się na właściwościach hydrofobowych i hydrofilowych ziaren. Flotacja odbywa się w medium płynnym, którym najczęściej jest woda z doprowadzeniem powietrza. Ziarna hydrofobowe tworzą z pęcherzykami powietrza w wyniku zderzenia agregaty wynoszone na powierzchnię wody. Dodatkowym warunkiem utworzenia agregatu jest odpowiedni rozmiar ziarna. Zbyt duże ziarno nie będzie wynoszone przez pęcherzyk powietrza, natomiast zbyt małe nie będzie w stanie utworzyć agregatu. Piana tworząca się na powierzchni jest zgarniana jako koncentrat flotacji, chociaż czasami z uwagi na ekonomię procesu flotowana jest skała płonna, natomiast składnik użyteczny pozostaje wzbogacony w „odpadzie” (Drzymała, 2001).

Dużą zaletą tej metody jest możliwość selektywnego rozdziału ziaren. Wynika to nie tylko z różnic w hydrofobowości ziaren w poddawanej procesowi nadawie, ale również z możliwości modyfikowania właściwości hydrofobowych powierzchni ziaren oraz ich flotowalności. W tym celu wykorzystuje się różnego rodzaju odczynniki, które dzieli się na kolektory, substancje hydrofilizujące, elektrolity oraz modyfikatory. Odpowiedni dobór parametrów i odczynników użytych w procesie powinien skutkować możliwie dużym

uzyskiem składnika oczekiwanego w jak najkrótszym czasie, czego miarą powinna być opłacalność przeprowadzanego procesu (Drzymała, 2001).

Powierzchnia ciał hydrofilowych oraz hydrofobowych może być modyfikowana (hydrofobizowana) przy pomocy kolektorów. W przypadku rud metali, gdzie ważne jest rozdzielanie ziaren różnych minerałów, istotne jest, aby kolektor działał selektywnie, czyli adsorbował tylko na wybranych minerałach. Kolektory mogą wpływać również na czas kontaktu ziarna z pęcherzykiem powietrza, a także tworzenie i stabilność piany. Przy doborze kolektora należy mieć na uwadze, że każdy ma swoje granice optymalnego działania w zależności od pH środowiska oraz stężenia kolektora. Stężenie jest szczególnie istotne w przypadku kolektorów, które są zdolne do tworzenia miceli w roztworze (Drzymała, 2001).

Drugą grupą odczynników są speniacze. Ich głównym zadaniem jest przyspieszenie procesu flotacji przez skrócenie czasu indukcji oraz dzięki tworzeniu stabilnej piany poprzez dyspergowanie gazu. Utworzenie stabilnej piany jest jednym z najważniejszych elementów prowadzonej flotacji, gdyż właśnie w pianie znajdują się ziarna ulegające procesowi flotacji. Piana więc musi być wystarczająco stabilna, aby umożliwić jej zebranie wraz z wyflotowanym materiałem, ale jednocześnie nie może być za bardzo stabilna, tak aby już po zebraniu można było ją wygasić. Podobnie jak w przypadku kolektorów, istnieje wiele rodzajów speniaczy. Dodatkowo niektóre rodzaje speniaczy mogą być jednocześnie kolektorami. Speniacz dobiera się przy uwzględnieniu flotowanej rudy, a także użytych innych odczynników, które mogą mieć wpływ na ich działanie. Na uwadze należy mieć, że obecność rozpuszczalnych soli w układzie flotacyjnym zmniejsza efekty działania speniacza. Ponadto speniacz powinien tworzyć możliwie mało uwodnioną pianę, z uwagi na wynoszenie mechaniczne wraz z wodą ziaren skał płonnych, które zubażają uzyskiwany koncentrat (Drzymała, 2001).

Trzecia grupa odczynników to aktywatory. Odczynniki te wywołują lub usprawniają flotację przy zastosowaniu kolektora. Użyty aktywator może również pełnić funkcję depresora, jeżeli zostanie użyty z innym kolektorem lub w innym stężeniu. Aktywatorami najczęściej są kationy metali, np. Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} oraz Ag^+ . W ten sposób można aktywować siarczki. W przypadku utlenionych rud metali, można stosować aktywatory siarczkowe, jednak wymaga to ich usunięcia zaraz po aktywacji flotacji z uwagi na konkurencję z kolektorem ksantogenianowym w adsorpcji na powierzchni flotowanych ziaren (Drzymała, 2001).

Odmienne działanie niż kolektory oraz aktywatory mają depresory. Tak jak te pierwsze są wykorzystywane do hydrofobizacji interesujących nas składników nadawy, tak depresory służą do hydrofilizacji składników płonnych, zwiększając selektywność procesu. Jednymi z najczęściej wykorzystywanych depresorów są kwasy oraz zasady regulujące pH w jakim zachodzi proces. Możliwe jest również stosowanie depresorów redoks, które poprzez utlenianie lub redukcję wpływają m.in. na skład chemiczny i budowę ziaren. Ostatnią grupą depresorów są odczynniki rozkładające zaadsorbowany kolektor (Drzymała, 2001).

Czyste żelazo jest hydrofilowe, czyli nie tworzy agregatów ziarno-pęcherzyk powietrza. Metale rodzime oraz siarczki metali można flotować w obecności ksantogenianów oraz aerofloatów. Tlenki, wodorotlenki i krzemiany, w tym chromit, oraz sole trudno rozpuszczalne, np. apatyt również występujący w rudzie chondrytowej można flotować w obecności kolektorów anionowych oraz kationowych. Na przykład chromit oraz inne minerały tlenkowe żelaza flotują w obecności jonów oleinianowych w pH wynoszącym około 8,0-8,7. Flotacja siarczków przy wykorzystaniu ksantogenianów wymaga użycia także speniaczy. Siarczki mogą być flotowane również przy wykorzystaniu oleinianów oraz amin. Ziarnisty odpowiednik troilitu – pirotyn (FeS) może być aktywowany jonami cynku, ołowiu, miedzi czy srebra (Drzymała, 2001). Przepuszczalnie w podobny sposób można aktywować troilit.

Do eksperymentów flotacyjnych przy opracowywaniu technologii wzbogacania rud wykorzystuje się maszynki flotacyjne, będące mniejszymi odpowiednikami maszyn przemysłowych (Drzymała, 2001). Dzięki nim można eksperymentalnie w mikroskali dobierać rodzaje oraz ilości odczynników, a także ustalać szczegóły techniczne procesu, np. ilości dostarczanego powietrza czy prędkości obrotów wirnika.

3.10. Aglomeracja olejowa

W tego rodzaju separacji wykorzystywane są: napięcie międzyfazowe oleju z wodą oraz właściwości akwaolejofilne ziaren mineralnych, czyli ich zdolność do łączenia się w aglomeraty z olejem w obecności wody. Najczęściej minerały, które wykazują właściwości hydrofilowe, w przypadku aglomeracji olejowej, wykazują właściwości akwaolejofobowe, natomiast hydrofobowe – akwaolejofilowe (Drzymała, 2001).

Aglomeracja olejowa jest stosowana przede wszystkim do wzbogacania węgla, jednak możliwe jest również wykorzystanie jej przy innego rodzaju surowcach (Drzymała, 2001). Z uwagi jednak na jej małe wykorzystanie we wzbogacaniu rud metali istnieje zbyt mało danych, na podstawie których można byłoby określić jej przydatność przy separacji rudy chondrytowej.

3.11. Separacja z wykorzystaniem właściwości mechanicznych ziaren mineralnych

Ten typ separacji wykorzystuje przede wszystkim kruchość (podatność na rozdrabnianie) oraz elastyczność (podatność na deformacje plastyczne lub sprężyste) ziaren. W praktyce ziemskiej ten typ separacji raczej nie jest wykorzystywany. Jednak poza Ziemią można spodziewać się jego znacznie szerszego zastosowania. Eisele (2001) wskazuje, że możliwe jest wykorzystanie elastyczności krzemianów do ich odseparowania poprzez skierowanie strugi nadawy na płytę, od której to będą się odbijać, gdy pozostałe składniki będą poruszać się wzdłuż płyty. Wskazuje także na możliwość wykorzystania kruchości składników nadawy, do rozdzielenia stopu FeNi i krzemianów od lodów i aglutynatów. Oczywiście metody te można połączyć w jednym procesie (Eisele, 2001).

3.12. Troilit (FeS) – niepożądany składnik rudy chondrytowej

Jednym z najważniejszych zadań procesów przeróbczych przy rozważaniu rud chondrytowych jest usunięcie z koncentratu żelazowo-niklowego siarczku żelaza – troilitu (FeS). Siarka jest niepożądanym składnikiem przy produkcji stali. Dopuszczalna zawartość siarki w rudzie skierowanej do produkcji stali to 0,1% (Rezvani Pour i in., 2016).

W warunkach ziemskich siarczki, przede wszystkim piryt (FeS_2), mogą być usuwane na dwa sposoby: pirometalurgicznie poprzez wytopienie lub konwersje lub hydrometalurgicznie poprzez flotację, ługowanie lub bioługowanie (Rezvani Pour i in., 2016). Troilit, w odróżnieniu do pirotynu, nie wykazuje właściwości magnetycznych w związku z czym istnieje teoretyczna możliwość rozdzielenia ziaren siarczku i stopu FeNi wykorzystując separację magnetyczną. Jednak z uwagi na sposób występowania troilitu jako zrosty z ziarnami stopu FeNi proces ten nie wydaje się wystarczający. W górnictwie pozaziemskim szczególnie ciekawe wydaje się zastosowanie procesów biotechnologicznych do rozpuszczania minerałów siarczkowych. Wykorzystując bakterie utleniające żelazo oraz siarkę można w pewnym stopniu rozwiązać problem występowania troilitu w koncentracie, a z drugiej strony otwiera to możliwości

wykorzystania dodatkowych źródeł żelaza, a także innych metali, będących składnikami troilitu (Dunbar, 2017).

4. Skały reprezentujące planetoidy macierzyste chondrytów zwyczajnych

4.1. Charakterystyka ciał macierzystych chondrytów zwyczajnych

W 1796 roku Pierre Simon Laplace w książce *Exposition du système du monde* przedstawił swoją hipotezę powstania Układu Słonecznego. Zgodnie z nią, z wirującej mgławicy pyłów i gazów będącej prasłońcem oddzieliły się pierścienie materii, z których formowały się planety. Dziś już wiemy, że proces ten był zdecydowanie bardziej skomplikowany. Materia budująca Układ Słoneczny została poddana akrecji, koagulacji, aglomeracji, przetopieniu, dyferencjacji, solidyfikacji związanej z bombardowaniem (solidyfikacja musiała być po bombardowaniu, które topiło planetę), kolizjami, rozpadami, brekcjonowaniem i ponownym formowaniem, a także metamorfizmem, zmianami związanymi z działaniem wody oraz szokiem impaktowym (Grady et al., 2014). Świadczą o tym bardzo duże różnice w budowie oraz składzie poszczególnych planet, księżyców, a nawet planetoid.

Pierwotna mgławica słoneczna składała się w 74% z wodoru, 24% z helu oraz w 2% z pozostałych składników, głównie wody, skał, metanu oraz amoniaku powstałych w wyniku syntezy jądrowej wewnątrz wcześniej istniejących gwiazd. Skład skał obecnych w dysku protoplanetarnym pierwotnej mgławicy reprezentują chondryty węgliste grupy CI – najbardziej prymitywnej grupy meteorytów kamiennych (Taylor i McLennan, 2009). Gdy Słońce rozpoczęło reakcję syntezy jądrowej helu z wodoru pojawiły się silne wiatry słoneczne, które spowodowały przemieszczenie wewnętrznej mgławicy wraz z kondensacją lodu w promieniu 5 jednostek astronomicznych, czyli za tzw. linię śniegu (ang. *frost line*). To wówczas powstała materia o składzie chondrytów CI. Później w innych miejscach zaczęła powstawać materia o składzie innych chondrytów, nie-chondrytów oraz achondrytów. Z powstałej materii zaczęły tworzyć się planetozymale, które obecnie znajdują się w Pasie Planetoid oraz w Pasie Quipera, a być może także w Obłoku Oorta. Planety zaczęły powstawać stosunkowo późno, po tym jak Słońce weszło w etap gwiazdy typu T Tauri. Stosunkowo szybko (około 10 tysięcy lat) uformowały się jądra planet zewnętrznych. Ich masa była na tyle duża, że wynikająca z niej siła grawitacji przyciągała duże ilości gazów z mgławicy (Taylor i McLennan, 2009). Dodatkowo czym dalej od centrum Układu Słonecznego, tym wpływ grawitacyjny Słońca jest mniejszy i większa jest możliwość uformowania dużej atmosfery (Tasker, 2018). Gazowe olbrzymy uformowały się ostatecznie w ciągu 3-10 milionów lat, gdyż po takim czasie zanika mgławica protosłoneczna. Ich wielkość, zwłaszcza Jowisza oraz Saturna, wskazuje, że planety te musiały zacząć powstawać w większej odległości od Słońca i w trakcie formowania powoli przybliżać się do centrum Układu Słonecznego, aż osiągnęły swoje obecne orbity. Zmiany orbit tych planet w czasie ich formowania się spowodowały, że masa grawitacyjnie przechwytywanego materiału mogła być znacznie większa, niż gdyby orbity te były niezmiennie. Za tą teorią genezy planet zewnętrznych przemawia duże wzbogacenie tych planet w lód oraz skały w stosunku do składu słońca (Taylor i McLennan, 2009; Tasker, 2018).

Planety wewnętrzne powstały w późniejszym okresie niż planety zewnętrzne. Ich skład mocno odbiega od pierwotnego składu skał (reprezentowanego przez chondryty CI). Skład tych planet, jak i wielu planetoid zubożony jest w pierwiastki o umiarkowanej lotności (temperatura skraplania w granicach 400-1100K). Wskazuje to, że temperatura spadła poniżej 1100K już po utworzeniu się Słońca, jednak jeszcze przed utworzeniem się chondr. Dlatego też planety oraz niektóre planetoidy nie mają składu pierwiastkowego pierwotnej mgławicy słonecznej. Różnice w składzie po części wynikają również z tego, że w czasie formowania planet wewnętrznych,

w obszarze tym występował już niemal sam skalisty gruz, który w mniejszym stopniu poddawał się działalności wiatru słonecznego niż gaz i lód. Gdyby powstawały w warunkach podobnych do planet zewnętrznych, czyli w mgławicy, na Ziemi byłoby zdecydowanie więcej wody, ale także metanu i amoniaku. Większe obiekty Układu Słonecznego tworzyły się poprzez zderzenia coraz to większych fragmentów skał. Pozostałościami tego procesu są planetoidy, a także dwa księżyce Marsa: Deimos i Fobos, które są przechwyconymi przez grawitację Marsa asteroidami. W części tych ciał można wyróżnić metaliczne rdzenie oraz krzemianowe płaszczce, które wydzielili się na drodze dyferencjacji. Świadkiem i dowodem tych wydarzeń była m.in. planetoida 4 Vesta, na której powierzchni około 4,5 mld lat temu doszło do erupcji bazaltów – skał macierzystych eukrytów. Szacuje się na podstawie badań meteorytów oraz struktury pasa planetoid, że większość planetoid w promieniu 2,7 j.a. od Słońca uległo przetopieniu (Taylor i McLennan, 2009).

Badania izotopowe chondr w chondrytach zwyczajnych prowadzone metodą Pb-Pb wykazały, że zostały uformowane w tym samym czasie co chondry chondrytów węglistych, czyli około 4,562 miliarda lat temu. Dodatkowo analizy te pozwoliły oszacować, że ciała macierzyste chondrytów H powstały ponad 3,5 miliarda lat temu (Grady i in., 2014).

Większość chondrytów zwyczajnych zbudowanych jest ze zredukowanych form metalicznych, siarczków oraz krzemianów, których równowaga ustaliła się w stosunkowo niskim ciśnieniu. Ponadto również są zubożone w pierwiastki lotne, podobnie jak planety wewnętrzne Układu Słonecznego. Źródłem ciepła prowadzącym do topienia się tych ciał były prawdopodobnie izotopy ^{26}Al oraz ^{60}Fe . Obiekty pasa planetoid nie utworzyły planety, ponieważ miały zbyt małą masę (w sumie nieco ponad 5% masy Księżyca) i nie zderzały się ze sobą. Główną przyczyną było oddziaływanie grawitacyjne pobliskiego Jowisza, które „ściągało” pobliski materiał, natomiast obiekty które pozostały pod wpływem tych oddziaływań zmieniały mimośród i odchylenie (Taylor i McLennan, 2009). Brak dyferencjacji części tych obiektów może wynikać właśnie z ich małej masy, w związku z czym planetoidy będące ciałami macierzystymi chondrytów szybciej stygły. Dyferencjację, w przypadku planet, umożliwiły kolizje dużych obiektów, często przekraczających wielkością Księżyc, które dostarczały dużej ilości energii niezbędnej do przetapiania składników mineralnych budujących te ciała i do zachodzenia dyferencjacji (Taylor i McLennan, 2009).

Dane dotyczące powierzchni niewielkich obiektów Układu Słonecznego, jak np. planetoid będących ciałami macierzystymi chondrytów pozyskiwane są na kilka sposobów. Najbardziej szczegółowe dane dotyczące wyglądu powierzchni pochodzą ze zdjęć zrobionych przez sondy kosmiczne. Mierzone jest także widmo w zakresie widzialnym oraz bliskiej podczerwieni, dzięki czemu można określić skład mineralny powierzchni takiego ciała. Dużym ograniczeniem jest jednak możliwość pomiaru jedynie powierzchniowej warstwy grubości kilku mikrometrów. Na początku wydawało się dość prostym zadaniem odkrycie pochodzenia meteorytów znalezionych na Ziemi, porównując ich widma, z widmami obiektów z głównego pasa planetoid, czego potwierdzeniem miało być zidentyfikowanie planetoidy 4 Vesta jako ciała macierzystego meteorytowych bazaltów – eukrytów (a w późniejszym czasie także diogenitów oraz howardytów). Jednak ta klasa meteorytów jest stosunkowo rzadko spotykana. Najczęściej odnajdowane na Ziemi meteoryty to chondryty zwyczajne również pochodzące z głównego pasa planetoid. Jednak w ich przypadku, korzystając z tej samej metody co w przypadku eukrytów, nie udało się wskazać jednoznacznie, który obiekt z pasa planetoid może być ich ciałem macierzystym. Chociaż aktualnie przypuszcza się, że ciałami macierzystymi meteorytów zwyczajnych mogą być planetoidy typu S z uwagi na zawartość metalu, oliwinu oraz niskowapniowych piroksenów, widma tych planetoid są znacznie słabsze i bardziej

czerwone, niż widma chondrytów zwyczajnych. Nie oznacza to jednak, że planetoidy te nie są ciałami macierzystymi chondrytów zwyczajnych. Podobna sytuacja została opisana przy okazji porównania widma meteorytów księżycowych z próbkami dostarczonymi bezpośrednio z Księżyca w ramach misji Apollo. W przypadku Księżyca powodem rozbieżności okazały się obecne na powierzchni ziarna żelaza wielkości od 4 do 30 nm. Ziarna te pochodziły z uderzeń mikrometeorytów, po których następowało osadzanie się fazy gazowej na ziarnach. Także w przypadku planetoid typu S rozbieżności wynikają prawdopodobnie z działalności „wietrzenia kosmicznego” (Taylor i McLennan 2009), które jest skutkiem bombardowania regolitu promieniowaniem kosmicznym oraz pyłem międzyplanetarnym (Grady i in., 2014).

Aktualnie funkcjonują dwa modele budowy wewnętrznej planetoid będących ciałami macierzystymi chondrytów zwyczajnych: *onion-shell* oraz *rubble pile*. Model *onion-shell* zakłada, że najbardziej zewnętrzna część planetoidy zbudowana jest ze skał o typie petrograficznym 3. Wraz z głębokością typ petrograficzny wzrasta aż do 6 lub nawet 7. Teoria ta jest wspierana przez badania izotopowe Hf-W, z których wynika, że w przypadku chondrytów H4 procesy termiczne zachodziły jednocześnie wraz z formowaniem i agregacją chondr, natomiast procesy termiczne w chondrytach H6 zachodziły jeszcze 10 milionów lat po uformowaniu się CAI, czyli około 8 milionów lat po formowaniu się chondr. Drugi model zakłada, że pierwotne ciało macierzyste uległo rozdrobnieniu i ponownej agregacji, stąd jego nazwa *rubble pile*, którą można przetłumaczyć jako „sterta gruzu” (Grady i in., 2014). Na podstawie badań spektroskopowych w podczerwieni wykazano, że powierzchnia planetoid charakteryzuje się niskim przewodnictwem ciepła, co oznacza, że są one pokryte luźnym regolitem (Żbik, 2020).

Planetoidy typu S są uznawane aktualnie za potencjalne ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych (Gaffey i in., 1993), a najlepsze dopasowanie wykazuje podklasa S(IV) (Grady i in., 2014). Około 30-35% wszystkich znanych planetoid stanowią właśnie planetoidy typu S (Łuszczek, 2021). Jako ciało macierzyste chondrytów zwyczajnych podawane są także planetoidy klasy Q (McSween i Huss, 2010). W odróżnieniu do planetoid typu S, planetoidy typu Q zaobserwowane zostały jedynie poza Pasem Planetoid jako tzw. obiekty bliskie ziemi (NEO – *Near Earth Objects*) i ich widma odpowiadają widmom chondrytów zwyczajnych grupy LL. Do 2013 roku spośród 400 obserwowanych w świetle widzialnym tzw. NEO, 2/3 stanowiły planetoidy typu S lub Q. Spośród nich 15% to prawdopodobne ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych grupy H, 10% grupy L, 60% grupy LL i pozostałe 15% L/LL (Łuszczek, 2021).

Powszechnie uznaje się, że ciałem macierzystym chondrytów zwyczajnych z grupy H jest planetoida 6 Hebe (Gaffey i Gilber, 1998). Jest to jeden z największych obiektów pasa planetoid. Jej masę oszacowano na $1,27 \cdot 10^{16}$ Mg (Baer i in., 2011). Wielkość zasobów żelaza zawartych w stopie FeNi, będąca obiektem zainteresowania niniejszej pracy została oszacowana na $1,91 \cdot 10^{15}$ Mg, co reprezentuje niemal 54% całkowitej zawartości żelaza w tej planetoidzie (Blutstein i in., 2018). Pozostałe żelazo buduje przede wszystkim troilit oraz krzemiany. Skład typowy dla chondrytów zwyczajnych grupy H mają także planetoidy 3 Juno (prawdopodobieństwo 89%) oraz 25 Phocaea (prawdopodobieństwo 98,6%), jednak jest mało prawdopodobne, by były one ciałami macierzystymi chondrytów odnajdowanych na Ziemi (Noonan i in., 2019).

Ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych z grup L i LL są mniej oczywiste. Wskazuje się kilka planetoid typu S o kompozycji mineralnej zbliżonej do tych grup chondrytów. Jednym z nich jest planetoida 433 Eros, która była obiektem badań misji NEAR Shoemaker (ang. *Near Earth Asteroid Rendezvous*) sfinansowanej przez NASA. Jest to druga co do wielkości

planetoida spośród tzw. obiektów NEA (ang. *Near Earth Asteroids*). Do badań tej planetoidy wykorzystano techniki XRF oraz GRF (McSween i Huss, 2010). Chociaż stosunki Cr/Fe, Mn/Fe oraz Ni/Fe są zgodne z wartościami typowymi dla chondrytów L lub LL wyniki nie były jednoznaczne z uwagi na małą zawartość siarki (Taylor i McLennan, 2009). 433 Eros zdaje się być planetoidą o składzie pomiędzy chondrytami grupy H i L (Grady i in., 2014). Planetoida 7 Iris z prawdopodobieństwem 97,5% jest ciałem macierzystym chondrytów grupy LL (Noonan i in., 2019).

Kolejna planetoida, która była celem wzmożonego zainteresowania naukowców to 25143 Itokawa, którą na cel wzięła sonda Hayabusa, należąca do JAXA (japońska agencja kosmiczna). W 2005 roku sonda wylądowała na tym niewielkim, 400-metrowym obiekcie w celu pobrania próbek. Niestety z powodu awarii systemu jedynie niewielka ilość drobin dostała się do zasobnika. Planetoida ta jest typu sterty gruzu (ang. *rubble pile*), pokryta drobnym żwirem. Badania były prowadzone przy wykorzystaniu techniki XRF. Jej skład jest zbliżony do chondrytów zwyczajnych LL (Taylor i McLennan, 2009; McSween i Huss, 2010; Grady i in., 2014). Na podstawie analiz wykonanych przez sondę Hayabusa ustalono, że jej powierzchnia w 70-80% składa się z oliwinu, natomiast drugim pod względem zawartości minerałem jest piroksen (Taylor i McLennan, 2009). W roku 2010 sonda Hayabusa dostarczyła na Ziemię pierwsze próbki pobrane bezpośrednio na planetoidzie (Łuszczek, 2021).

Najcenniejsze pod względem górnictwa pozaziemskiego, przynajmniej w początkowych etapach rozwoju, będą mniejsze planetoidy bliskie Ziemi, tzw. NEO (ang. *Near Earth Objects*) (Binzel i in., 2015). Skład chondrytów zwyczajnych grupy H mają planetoidy: (5587) 1990 SB, (5626) 1991 FE, (16960) 1998 QS₅₂, (99907) 1989 VA, (138524) 2000 OJ₈, (143624) 2003 HM₁₆ oraz (159857) 2004 LJ. Dla chondrytów grupy L przyporządkowano planetoidy: (18736) 1998 NU, (24475) 2000 VN₂, (68950) 2002 QF₁₅, (86039) 1999 NC₄₃ oraz (200840) 2001 XN₂₅₄. Planetoidy ze składem charakterystycznym dla chondrytów LL to m.in.: (1620) Geographos, (1627) Ivar, (1685) Toro, (30825) 1990 TG₁ oraz (99942) Apophis. Znanych jest także szereg planetoid o składzie pośrednim L/LL, np.: (719) Albert, (65803) Didymos oraz (162149) 1998 YQ₁₁ (Dunn i in., 2013; Łuszczek, 2021).

4.2. Budowa chondrytów zwyczajnych

Skały chondrytowe są agregatami zbudowanymi z różnych komponentów: chondr, trudnotopliwych inkluzji, metali, siarczków oraz matrix. Najbardziej charakterystycznym składnikiem są chondry. Powstały one w wyniku szybkiego topienia w temperaturze 1770 – 2120K, a następnie bardzo szybkiego ochłodzenia oraz krzepnięcia (McSween i Huss, 2010). Chondry charakteryzują się bardzo zróżnicowanym składem oraz strukturą i teksturą. Zdecydowana większość chondr zbudowana jest z oliwinów oraz/lub piroksenów. Powszechnie współwystępuje szkliwo, które powstało w wyniku ekstremalnie szybkiego krzepnięcia stopu. W wielu chondrach występują również ziarna stopu FeNi oraz troilit (FeS). Chondry stanowią do 70% objętości skały chondrytowej.

W skałach chondrytów zaobserwowano dwa typy inkluzji trudnotopliwych: inkluzje bogate w wapń i glin (CAI; ang. *Calcium Aluminium Inclusions*) oraz ameboidalne agregaty oliwinowe (AOA; ang. *Ameboid Olivine Aggregates*). Minerale tworzące CAI to przede wszystkim: hibonit, perowskit, melilit, spinel, diopsyd bogaty w glin i tytan, anortyt oraz forsteryt. Na podstawie badań izotopowych wykazano, że CAI są najstarszymi obiektami wytworzonymi w Układzie Słonecznym. Występują przede wszystkim w chondrytach węglistych, jednakże są niekiedy obserwowane także w innych typach chondrytów (McSween

i Huss, 2010). Wymiary CAI są bardzo zróżnicowane. Na przykład w meteorycie Allende występują CAI o powierzchni od 0,5 do 1,75 mm² (Ebel i in., 2008). AOA swoją nazwę zawdzięczają nieregularnemu kształtowi. Inkluzje tego typu są drobnoziarniste, porowate i mają wymiary porównywalne do CAI. Minerale tworzące AOA to przede wszystkim forsteryt oraz w mniejszej ilości stop FeNi, anortyt, spinel oraz diopsyd bogaty w glin (McSween i Huss, 2010).

W chondrytach występują dwa rodzaje metali. Najpowszechniejsze są stopy żelaza, niklu oraz kobaltu, które w warunkach powolnego krzepnięcia ulegały odmieszananiu na ubogi w nikiel kamacyt oraz bogaty w nikiel taenit. Drugi rodzaj, to stopy irydu, osmu, rutenu, molibdenu, wolframu oraz renu występujące w CAI. W temperaturze poniżej 650K występująca w pierwotnej mgławicy siarka reagowała z żelazem tworząc siarczki żelaza, czyli troilit – najpowszechniej występujący siarek w chondrytach (McSween i Huss, 2010).

Ostatnim komponentem chondrytów jest matrix, utworzone z bardzo drobnych minerałów wypełniających przestrzenie pomiędzy większymi elementami skały chondrytowej. Minerale tworzące matrix to przede wszystkim oliwiny oraz pirokseny, ale także inne krzemiany, tlenki, siarczki, metale, fosforany i węglany. Minerale matrix są ponadto bogatsze w pierwiastki lotne (McSween i Huss, 2010).

4.3. Podział chondrytów

Na przestrzeni wielu lat badań meteorytów powstało wiele ich klasyfikacji. Pierwszy podział meteorytów dzielił je na dwie grupy: meteoryty kamienne oraz żelazne. Aktualnie meteoryty dzielimy na dwie podstawowe grupy: meteoryty zdyferencjonowane oraz niezdyferencjonowane. Meteoryty niezdyferencjonowane tworzą szeroki typ meteorytów: chondryty, które zaliczają się do meteorytów kamiennych. Meteoryty tego typu mają skład zbliżony do fotosfery słonecznej, z wyjątkiem najbardziej lotnych pierwiastków (Grady i in., 2014).

Pierwszym kryterium podziału chondrytów jest ich skład pierwiastkowy, na podstawie którego chondryty rozdzielane są na poszczególne klany, a te z kolei na grupy (McSween i Huss, 2010). Chondryty, zgodnie z klasyfikacją Weisberga i in. (2006) dzielimy na trzy klasy: chondryty węgliste, chondryty zwyczajne oraz chondryty enstatytowe, które dalej dzielą się na klany i grupy. Wśród chondrytów znajdują się także dwie grupy: R oraz K, które nie są przyporządkowane do żadnej klasy ani klanu (Tabela 4.1).

Droga do uzyskania powszechnie używanej aktualnie klasyfikacji chondrytów Weisberga (Weisberg i in., 2006) była długa. Pierwsza klasyfikacja z 1863 roku Gustava Rose'a dzieliła meteoryty na trzy grupy meteorytów żelaznych oraz siedem grup meteorytów kamiennych. Właśnie Gustav Rose jako pierwszy wprowadził pojęcie chondry i nazwał meteoryty zbudowane z chondr – chondrytami. W latach 1916 – 1920 zaproponowano klasyfikację, której podstawą były analizy chemiczne. Na podstawie zawartości żelaza w piroksenach podzielono chondryty na enstatytowe, oliwinowo-bronzytowe oraz hiperstenowo-bronzytowe. W 1953 roku Urey i Craig wykazali, że chondryty można podzielić na podstawie zawartości żelaza. Na tej podstawie chondryty oliwinowo-bronzytowe zostały uznane za grupę H (*high total iron content*, około 28%wag.), a hiperstenowo-bronzytowe za grupę L (*low total iron content*, około 22%wag.). Ponadto grupę L podzielono na dwa typy: Baroti oraz Soko-Banja. Analizy meteorytów typu Soko-Banja przy użyciu mikrosondy elektronicznej wykazały, że meteoryty te co prawda mają charakterystyczną zawartość żelaza dla grupy L, jednak wykazują mniejszą zawartość żelaza metalicznego. Na tej podstawie wydzielono typ Soko-

Banja jako osobną grupę LL (*low total iron, low metallic iron*). Te trzy grupy chondrytów (H, L oraz LL) tworzą klasę chondrytów zwyczajnych. Nazwa związana jest z tym, że chondryty te stanowią około 87% wszystkich znanych meteorytów i około 95% wszystkich znanych chondrytów (Grady i in., 2014).

Tabela 4.1. Klasyfikacja chondrytów (na podstawie Weisberg i in., 2006, z modyfikacjami autora)

| Typ | Klasa | Klan | Grupa | Pełna nazwa grupy | |
|----------------------|-----------------------|---------------------|---------------|------------------------------------|----------------|
| chondryty | chondryty węgliste | klan CI | CI | Ivuna type | |
| | | CM-CO | CM | Mighei type | |
| | | | CO | Ornans type | |
| | | | CV | Vigarano type | |
| | | CV-CK | CK | Karoonda type | |
| | | | klan CR | CR | Renazzo type |
| | | | | CH | High-iron type |
| | | CB | | Bencubbinites | |
| | | chondryty zwyczajne | H-L-LL | CL | Loongana type |
| | H | | | Bronzite (high iron) | |
| | L | | | Hypersthene (low iron) | |
| | chondryty enstatytowe | EH-EL | LL | Amphoterites (low iron, low metal) | |
| | | | EH | High metal | |
| EL | | | Low metal | | |
| | | R | Rumurutiites | | |
| | | K | Kakangariites | | |
| achondryty pierwotne | ACA-LOC | ACA | Acapulcoites | | |
| | | LOD | Lodranites | | |
| | WIN-IAB-IIIE | WIN | Winonaites | | |
| | | IAB | | | |
| | | IIIE | | | |
| | | | URE | Ureilites | |
| | | BRA | Brachinites | | |
| achondryty | | | ANG | Angrites | |
| | | | AUB | Aubrites | |
| | HED | | EUC | Eucrites | |
| | | | DIO | Diogenites | |
| | | | HOW | Howardites | |
| | | | MES | Mesosiderites | |
| | | | PAL MG | Pallasites Main-group | |
| | | | PAL ES | Pallasites Eagle Station | |
| | | | PAL PP | Pallasites Pyroxene | |
| | Moon | | LUN A | Lunar anorthositic breccias | |
| | | | LUN B | Lunar mare basalts | |
| | | | LUN G | Gabbro | |
| | Mars | | SHE | Shergottites | |
| | | | NAK | Nakhlites | |
| | | | CHA | Chassignites | |
| | | | OPX | Orthopyroxenites | |
| | | | BBR | Basaltic Breccia | |
| | | | IC | | |
| | | | IIAB | | |
| | | | IIC | | |
| | | | IID | | |
| | | | IIF | | |
| | | | IIG | | |
| | | IIIAB | | | |
| | | IIIE | | | |
| | | IIIF | | | |
| | | IVA | | | |
| | | IVB | | | |

Klasa chondrytów węglistych została już wyróżniona przez Gustava Rose'a w 1863 roku. Pierwszy wewnętrzny podział tych chondrytów na typy I, II oraz III został zaproponowany przez Wiika na podstawie zawartości składników lotnych (węgla, wody i siarki) oraz ich ciężaru właściwego. W późniejszym czasie typy te zmieniono na C1, C2 oraz C3, a jeszcze później podzielono typ C3 na C3(O) oraz C3(V). Wasson następnie zmienił nazwy tych grup na odpowiednio CI (Ivuna), CM (Mighei), CO (Ornans) oraz CV (Vigarano). Parę lat później dodano kolejną grupę chondrytów węglistych: CR (Renazzo). W obecnej klasyfikacji wyróżniamy dodatkowo grupę CK (Karoonda), CB (Bencubbin) oraz CH (high iron). W 2021 roku oficjalnie zatwierdzono grupę chondrytów węglistych CL (Loongana) opisaną przez Metzlera i współpracowników (2021). Aktualnie podstawą klasyfikacji meteorytu jako chondryt węglisty jest jego podobieństwo chemiczne do składu chemicznego fotosfery Słońca (Grady i in., 2014).

Klasa chondrytów enstatytowych wydzielona przez Priora charakteryzuje się dużą zmiennością zawartości siarki i żelaza. Zmiany te zostały połączone ze stopniem metamorfizmu i wydzielono dwie grupy: EI (duża zawartość żelaza i siarki, słabo zrekrystalizowany) oraz EII (mała zawartość żelaza i siarki, mocno zrekrystalizowany). Później nazwy te zmieniono odpowiednio na EH oraz EL, analogicznie jak w przypadku chondrytów zwyczajnych (Grady i in., 2014).

Ponadto wyróżniane są dwie grupy chondrytów nie przynależące do żadnej klasy: K (Kakangari) oraz R (Rumurutiite) (Grady i in., 2014).

Współcześnie podział na grupy odbywa się na podstawie składu pierwiastkowego, izotopowego, udziału matrix, chondr oraz metalu, a także właściwości chondr. Różnice te świadczą o różnych środowiskach formowania się pierwotnych ciał macierzystych tych grup meteorytów (Grady i in., 2014).

Pełna klasyfikacja chondrytów, prócz określenia przynależności do konkretnej grupy, wymaga także ustalenia typu petrograficznego, stopnia szokowego oraz stopnia wietrzenia meteorytu. Na podstawie składu mineralnego i struktury chondrytów Van Schmus i Wood zauważyli zróżnicowanie chondrytów w szerokim zakresie, od najmniej zmienionych (niezrównoważone żelazo w krzemianach, obecność szkliwa, wyraźne chondry) do mocno zmienionych w wyniku metamorfizmu termicznego i rekrytalizacji (skład krzemianów homogeniczny, brak szkliwa, zrekrystalizowane matrix, chondry mało wyraźne). Wyróżniono 6 typów petrograficznych (tabela 4.2) (Grady i in., 2014). Większość chondrytów występuje w typach 3-6. W typach 1-2 występują tylko chondryty węgliste. Ponadto niekiedy wydziela się jeszcze typ petrograficzny 7. Dodatkowo w 1980 roku Sears wraz ze współpracownikami podzielił typ 3 na typy od 3.0 do 3.9 na podstawie właściwości termoluminescencyjnych.

Kolejnym elementem klasyfikacji jest określenie stopnia szokowego meteorytu, czyli określenie zmian jakie zaszły w wyniku zderzeń ciał macierzystych w przestrzeni kosmicznej z innymi planetoidami. Sześciostopniowa skala opiera się na obserwacji zmian jakie zaszły w krzemianach, przede wszystkim w oliwinach, w wyniku wysokiego ciśnienia powstałego przy zderzeniu (tzw. szoku) (Tabela 4.3) (Grady i in., 2014).

Tabela 4.2. Kryteria dla poszczególnych typów petrograficznych na podstawie Grady i in. (2014) oraz McSween i Huss (2010) według Van Schmus-wooda

| kryterium | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 (7) |
|---|---------------------------------|---|--|---|--|--|
| jednorodność oliwinów oraz piroksenów niskowapniowych | - | średnie odchylenie powyżej 5% | | średnie odchylenie mniej lub równe 5% | jednorodne | |
| struktura kryształów piroksenów niskowapniowych | - | przeważnie jednoskośne | | powyżej 20% jednoskośne | poniżej 20% jednoskośne | rombowe |
| skalanie | - | tylko małe ziarna pierwotne | | ziarna wtórne poniżej 2 μm | ziarna wtórne od 2 do 50 μm | ziarna wtórne powyżej 50 μm |
| szkliwo chondrowe | brak lub zmienione | zmienione, przeważnie brak | przejrzyste, izotropowe, o różnej zawartości | zdewitryfikowane | nieobecne | |
| metal: maksymalna zawartość Ni | - | mniej niż 20%, taenit w mniejszości lub nieobecny | powyżej 20% | | | |
| siarczki: średnia zawartość Ni | - | powyżej 0,5% | poniżej 0,5% | | | |
| matrix | drobnoziarnisty, nieprzejrzysty | przeważnie drobny, nieprzejrzysty | klastyczny, przeważnie nieprzejrzysty | przezroczysty, zrekrytalizowany, gruboziarnisty | | |
| chondry | brak chondr | chondry bardzo ostro widoczne | | chondry dobrze widoczne | chondry częściowo widoczne | chondry słabo widoczne |
| węgiel (%) | 3-5 | 0,8-2,6 | 0,2-1 | poniżej 0,2 | | |
| woda (%) | 18-22 | 2-16 | 0,3-3 | poniżej 1,5 | | |

Tabela 4.3. Kryteria dla poszczególnych stopni szokowych według Grady i in (2014)

| stopień szokowy | efekty wynikające ze szczytowego ciśnienia równowagowego | | | efekty lokalne | ciśnienie szoku (GPa) |
|-------------------------------|--|--|---|---|-----------------------|
| | oliwiny | ortopirokseny | plagioklazy | | |
| S1 niezszokowany | ostre wygaszenie światła, nieregularne spękania | - | - | brak | poniżej 4-5 |
| S2 bardzo słabo zszokowany | faliste wygaszanie światła, nieregularne spękania | - | - | brak | 5-10 |
| S3 słabo zszokowany | faliste wygaszanie światła, spękania planarne i nieregularne | faliste wygaszanie światła, lamelki klinostatytu, spękania planarne i nieregularne | faliste wygaszanie światła | nieprzezroczyste żyłki szokowe, obecność stopionych fragmentów (kieszni), czasami połączonych ze sobą | 15-20 |
| S4 średnio zszokowany | spękania słabo mozaikowe oraz planarne | spękania słabo mozaikowe oraz planarne, zbliżniaczenia | faliste wygaszanie światła, częściowo izotropowe, cechy deformacji planarnych | nieprzezroczyste żyłki szokowe połączone ze sobą, obecność stopionych fragmentów (kieszni) | 30-35 |
| S5 mocno zszokowany | spękania mocno mozaikowe oraz planarne, cechy planarnych deformacji | spękania mocno mozaikowe oraz planarne | obecność maskelinitu | powszechnie obecne stopione fragmenty (kiesznie), nieprzezroczyste żyłki szokowe oraz dajki | 45-55 |
| S6 bardzo mocno zszokowany | tylko lokalnie i w pobliżu miejsc topienia, rekrytalizacja i przebarwienia w stanie stałym, przetopienia, ringwoodyt | obecność majorytu, przetopienia | przetopienia, szkliwo | powszechnie obecne stopione fragmenty (kiesznie), nieprzezroczyste żyłki szokowe oraz dajki | 75-90 |
| przetopienie szokowe | Przetopienie całej skały | | | | |

Ostatnim elementem klasyfikacji jest stopień wietrzenia, który jest miarą zmian jakie zaszły w meteorycie na Ziemi. Dla chondrytów zwyczajnych obowiązuje skala zaproponowana przez Wlotzkę (1993):

W0 – Brak widocznego utlenienia metalu lub siarczku. W świetle odbitym widoczne barwienie limonitem.

W1 – Drobne obwódki tlenków wokół ziaren metalicznych oraz siarczków; drobne żyłki tlenków.

W2 – Umiarkowane utlenienie około 20-60% ziaren metalicznych.

W3 – Mocne utlenienie około 60-95% ziaren metalicznych oraz troilitu.

W4 – Całkowite utlenienie (powyżej 95%) ziaren metalicznych oraz troilitu, brak zmian w krzemianach.

W5 – Początek zachodzenia zmian w krzemianach maficznych, przede wszystkim wzdłuż spękań.

W6 – Znaczne zastąpienie minerałów krzemianowych przez minerały ilaste i formy utlenione.

4.4. Skład mineralny i chemiczny chondrytów zwyczajnych

Chondryty zwyczajne dzielą się na trzy duże grupy: chondryty H o wysokiej zawartości żelaza metalicznego, chondryty L o niskiej zawartości żelaza metalicznego oraz chondryty LL o niskiej zawartości żelaza metalicznego oraz żelaza w ogóle. Te trzy grupy mają podobny skład mineralny (krzemiany (oliwiny, pirokseny, plagioklasy), minerały stopu FeNi, troilit), jednak różnią się składem chemicznym. Ponadto chondryty zwyczajne można dodatkowo podzielić na zrównoważone (EOC – *equilibrated ordinary chondrites*) o typach petrograficznych 4 – 6(7) oraz niezrównoważone (UOC – *unequilibrated ordinary chondrites*) o typach petrograficznych 3.0 – 3.9, chociaż minerały w chondrytach o typach petrograficznych od 3.6 są już dość zrównoważone. Chondryty zrównoważone charakteryzują się homogenicznym składem minerałów, natomiast niezrównoważone – składem heterogenicznym. Wynika to z warunków formowania się skały macierzystej. W przypadku gdy skała pierwotna była poddawana długotrwałemu ogrzewaniu łatwo zachodziła dyfuzja żelaza oraz magnezu, co prowadziło do równoważenia się składu krzemianów. Przy niedoborze tego ciepła dyfuzja ta nie zachodziła w wystarczającym stopniu i jej efektem jest wzbogacenie minerałów w części zewnętrznej w żelazo, a w części wewnętrznej w magnez. Oliwiny ulegają zrównoważeniu szybciej niż pirokseny (Grady i in., 2014).

Chondryty zwyczajne mają charakterystyczny skład chemiczny, na podstawie którego można je zaklasyfikować do tej klasy, jednak na tyle różny pod względem chemicznym i mineralnym, że nie ma wątpliwości, iż poszczególne grupy pochodzą z różnych ciał macierzystych. Na podstawie stosunków pierwiastków głównych można także określić do jakiej grupy dany meteoryt należy. Wykorzystuje się do tego m.in. stosunek Ca/Si do Al/Si. W przypadku pierwiastków głównych zauważono, że w stosunku do średniego składu chondrytów CI, chondryty zwyczajne uległy zubożeniu w pierwiastki bardziej lotne przy jednoczesnym wzbogaceniu w pierwiastki najmniej lotne. Ponadto chondryty zwyczajne są wzbogacone w pierwiastki ziem rzadkich. W przypadku chondrytów z grupy H zauważalne jest większe wzbogacenie w pierwiastki syderofilne oraz chalkofilne w stosunku do chondrytów grup L i LL (Grady i in., 2014). Podobny skład chemiczny i mineralny, a także występowanie klastów pochodzących z innych grup chondrytów zwyczajnych świadczy o powstaniu ciał macierzystych tych meteorytów w obszarach dysku protoplanetarnego znajdujących się blisko siebie, ale najlepszym dowodem tego są badania izotopowe tlenu. Stosunek izotopów tlenu ^{18}O do ^{17}O jest podobny dla wszystkich zrównoważonych chondrytów zwyczajnych i znacznie różni się od wartości charakterystycznych dla chondrytów enstatytowych oraz węglistych. Zauważono również wzrost wzbogacenia w izotop ^{16}O wraz ze wzrostem typu petrograficznego

skały. Różnice w stosunkach izotopowych tlenu w chondrytach niezrównoważonych wiążą się z obecnością chondr bogatych w glin (Grady i in., 2014).

Znanych jest co najmniej 435 minerałów występujących w skałach pochodzenia pozaziemskiego (Rubin i Ma, 2017). W chondrytach zwyczajnych, a także w chondrytach węglistych grup CO, CV, CK oraz CH i chondrytach grupy R najczęściej występują krzemiany (oliwiny, pirokseny), faza metaliczna (kamacyt, taenit), siarczki (troilit) oraz tlenki (chromit). Akcesorycznie występują także fosforany oraz węgliki (Rubin, 1997).

Oliwiny oraz pirokseny – główny składnik krzemianowy chondrytów, są minerałami występującymi powszechnie w Układzie Słonecznym, m.in. w górnym płaszczu Ziemi a także w płaszczu Księżyca, Marsa i Wenus. Wynika to wprost z powszechności występowania żelaza oraz magnezu – pierwiastków będących produktem nukleosyntezy zachodzącej w gwiazdach. Pierwiastki litofilne, które mogą w strukturze tych minerałów wchodzić w miejsce żelaza lub magnezu, są nazywane „kompatybilnymi”, natomiast te, które z uwagi na wielkość lub wartościowość nie mogą zastąpić tych pierwiastków, nazywane są „niekompatybilnymi” (Taylor i McLennan, 2009).

Wśród krzemianów najpowszechniej występują minerały z grupy oliwinów. Oliwiny w chondrytach zwyczajnych są składnikiem matrix oraz chondr (Manecki, 2004). Względna zawartość magnezu oraz żelaza w oliwinach jest ważna przy klasyfikacji meteorytów. Oliwiny tworzą ciągły szereg kryształów mieszanych o skrajnych członach: $Mg_2[SiO_4]$ (forsteryt) oraz $Fe_2[SiO_4]$ (fajalit). Poszczególne człony tego szeregu roztworów stałych mają swoje nazwy własne w zależności od zawartości molowej Mg_2SiO_4 : forsteryt (100-90%), chryzolit, inaczej oliwin właściwy (90-70%), hialosyderyt (70-50%), hortonolit (50-30%), ferrohortonolit (30-10%) oraz fajalit (10-0%) (Bolewski, 1982).

Kolejną powszechnie występującą grupą krzemianów są pirokseny. W chondrytach występują przeważnie pirokseny rombowe. Są także składnikiem chondr (Manecki, 2004; Grady i in., 2014). Pirokseny występujące w chondrytach związane są z trzema szeregami izomorficznymi. Ubogie w wapń pirokseny szeregu klinoenstatytu oraz ortopiroksenów, a także bogaty w wapń szereg diopsyd – hedenbergit. W skład szeregu klinopiroksenu wchodzi: klinoenstatyt ($Mg_2[Si_2O_6]$), klinohipersten ($(Mg,Fe)_2[Si_2O_6]$), klinoferrosilit ($Fe_2[Si_2O_6]$), a także zaliczane do tego szeregu pigeonity ($(Mg,Fe,Ca)_2[Si_2O_6]$). Szereg ortopiroksenów uporządkowany jest zgodnie z zawartością molową ferrosilitu ($Fe_2[Si_2O_6]$): enstatyt (0-10%), bronzyt (10-30%), hipersten (30-50%), ferrohipersten (50-70%) oraz eulit (70-90%). Czysty ferrosilit nie występuje w przyrodzie. Szereg diopsyd – hedenbergit tworzą cztery minerały: diopsyd ($CaMg[Si_2O_6]$) mogący zawierać domieszkę żelaza, salit ($Ca(Mg,Fe)[Si_2O_6]$), ferrosalit ($Ca(Fe,Mg)[Si_2O_6]$) oraz hedenbergit ($CaFe[Si_2O_6]$) mogący zawierać domieszkę magnezu (Bolewski, 1982).

Trzecią grupą minerałów, występujących powszechnie w chondrytach są będące glinokrzemianami plagioklasy, należące do skaleni sodowo-wapniowych. Najczęściej tworzą niewielkie kryształy w obrębie matrix wyższych typów petrograficznych. Występują często także jako maskelynit (stop plagioklazowy; szkliwo szokowe) wypełniający w chondrach przestrzeń (mesostasis) między oliwinami lub piroksenami (Siemiątkowski, 2001; Manecki, 2004).

Najważniejszą grupą minerałów, mających znaczenie złożowe są minerały stopu żelazowo-niklowego. Wśród nich można wyróżnić kamacyt (α -Fe,Ni), taenit (γ -(Fe,Ni)) oraz tetrataenit (FeNi). Kamacyt jest stopem o zawartości niklu w przedziale 4 – 7,5%. Gęstość kamacytu wynosi 7,85 g/cm³. Minerał ten występuje powszechnie w meteorytach, natomiast w skałach ziemskich jest niezwykle rzadki, w związku z czym dość jednoznacznie wskazuje na

pozaziemskie pochodzenie skały. Taenit jest silnie magnetycznym minerałem o gęstości w przedziale 7,8 – 8,2 g/cm³ (Manecki, 2004). Podobnie jak kamacyt występuje w meteorytach powszechnie, jest wskaźnikiem ich pozaziemskiego pochodzenia. Zawartość niklu w taenicie mieści się w przedziale 8 – 45% (Łuszczek, 2021). Stosunek taenitu do kamacytu zmienia się wraz z grupą chondrytów zwyczajnych i tak dla grupy H wynosi około 0,1, dla grupy L około 0,3 oraz dla grupy LL powyżej 0,9 (Rubin, 1997). Tetrataenit jest natomiast minerałem, powstającym w wyniku uporządkowania struktury taenitu w wolno stygnących meteorytach (Manecki, 2004). W jego skład wchodzi nikiel (48-57%), żelazo (44-52%), miedź (0,11-0,36%) oraz kobalt (do 2%) (Łuszczek, 2021). Bardzo rzadkim minerałem stopu FeNi jest awaruit (Ni₃Fe) o zawartości niklu w granicach 63-72% (Rubin, 1997). W chondrytach niezrównoważonych obserwuje się większą zawartość kamacytu niż taenitu. Ponadto minerały te różnią się także zawartością kobaltu: w kamacycie jest to około 1% masy, natomiast w taenicie około 0,2% masy. Dodatkowo w chondrytach zrównoważonych obecna w stopie jest również miedź (Grady i in., 2014). Szacuje się, że metaliczna miedź (miedź rodzima) występuje w 66% chondrytów zwyczajnych (Rubin, 1997).

Troilit, siarczek żelaza (FeS) jest pospolitym minerałem, występującym w niemal każdym typie meteorytów. Jego gęstość wynosi 4,67 g/cm³ (Manecki, 2004). Stanowi on od 5% objętości (LL) do 7% objętości (H i L) chondrytów zwyczajnych tworząc asocjację z fazą metaliczną. W chondrytach zróżnicowanych może występować także pentlandyt, głównie w chondrytach LL (Rubin, 1997; Grady i in., 2014). Troilit w odróżnieniu od pirotynu (FeS) występującego na Ziemi nie przejawia właściwości magnetycznych.

Chromit (FeCr₂O₄), jest minerałem z grupy spineli. Jego gęstość mieści się w zakresie 4,7 – 4,9 g/cm³. Jest to minerał występujący w chondrytach zwyczajnych typu 4-6 (Manecki, 2004). Wraz ze wzrostem typu petrograficznego zwiększa się także zawartość tego minerału. W szeregu H-L-LL zwiększa się zawartość tytanu oraz wanadu, natomiast spada zawartość chromu, magnezu i manganu (Łuszczek, 2021).

Spośród fosforanów w chondrytach zwyczajnych występują głównie dwa minerały: merillit (whitlockit) (Ca₉(Mg,Fe²⁺)[(PO₄)₆OH(PO₃)] oraz chlorapatyt (Ca₅[Cl](PO₄)₃). Zawartość fosforanów zwykle nie przekracza 2% (Łuszczek, 2021). Apatyty w chondrytach zwyczajnych są minerałami akcesorycznymi. Występują w typach 3.1 – 3.9 (Manecki, 2004).

W gronie minerałów akcesorycznych, występują dwa minerały tytanu: ilmenit (Fe²⁺TiO₃) oraz rutil (TiO₂). Ilmenit można obserwować w asocjacjach z ziarnami chromitu, troilitu oraz stopu FeNi, natomiast rutil występuje w asocjacjach ze stopem FeNi, chromitem oraz ilmenitem (Łuszczek, 2021). Wśród rzadkich minerałów w chondrytach zwyczajnych zaobserwowano także metaliczne fazy kobaltowe (około 37% kobaltu – chondryt LL). W niektórych wysokoutlenionych chondrytach typu 3 można także zaobserwować magnetyt ((Fe²⁺,Mg)(Al,V)₂O₄). Również w chondrytach zwyczajnych typu 3 można rzadko zaobserwować węgliki: cohenit (Fe₃C) oraz haxonit ((Fe,Ni)₂₃C₆) (Rubin, 1997).

W matrix chondrytów zwyczajnych o typie petrograficznym niższym niż 3.5 mogą występować ponadto minerały związane z działalnością fazy ciekłej: krzemiany warstwowe (smektyt), siarczki (pentlandyt ((Ni,Fe)₉S₈), pirotyt (Fe_{1-x}S)), węgliki (cohenit, haxonit), tlenki żelaza (magnetyt, maghemit (γ-Fe₂O₃) oraz kalcyt (CaCO₃) (Grady i in., 2014).

W niezrównoważonych chondrytach zwyczajnych o typach petrograficznych od 3.0 do 3.8 mogą występować dodatkowo ziarna mineralne sprzed powstania układu słonecznego, np. węglik krzemu, grafit, nanodiamenty, a także inkluzje bogate w wapń i glin (CAI) nie występujące w chondrytach zrównoważonych (Grady i in., 2014).

5. Cel pracy i tezy

Celem pracy jest sprawdzenie możliwości pozyskiwania surowców metalicznych z ciał macierzystych chondrytów zwyczajnych.

Tezy:

Źródłem metali, które można uzyskać z planetoid będących ciałami macierzystymi chondrytów zwyczajnych, są ziarna wszystkich faz mineralnych stopu FeNi. Zawierają one następujące metale: Fe, Ni oraz Co. Najlepszymi metodami wzbogacenia rudy chondrytowej w wymienione metale są: kruszenie i mielenie w kontrolowanych warunkach oraz flotacja.

6. Materiał badawczy

6.1. Tamdakht

Meteoryt Tamdakht spadł na Ziemię 20 grudnia 2008 roku w Maroko, w pobliżu miejscowości Ouarzazate. Odnaleziono wiele jego fragmentów. Całkowita masa tego meteorytu jest szacowana na 100 kg. Dominującymi minerałami są oliwin oraz ortopirokseny. Frakcję metaliczną stanowią kamacyt (5% Ni) oraz taenit (36-47% Ni). Troilit występuje w formie zbliźniaczeń. Meteoryt ten zawiera stosunkowo dużo chromitu. Występują w nim także merrilit, chloroapatyt oraz miedź. Meteoryt ten został sklasyfikowany jako chondryt zwyczajny H5, S3, W0 (Weisberg i in., 2009).



Rysunek 6.1. Meteoryt Tamdakht (źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tamdakht_meteorite_small.jpg)

Do badań przeznaczono 267 g meteorytu Tamdakht. Zakup meteorytu dla Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej został sfinansowany ze środków przyznanych na badania statutowe wydziału prowadzone w Zakładzie Geologii i Wód Mineralnych.

Ze względu na to, że minerały rudne będą dokładnie charakteryzowane w rozdziale 8, to aby tej charakterystyki mineralogiczno-petrograficznej nie rozdzielać na dwie części, kompleksową charakterystykę mineralogiczno-petrograficzną meteorytu przedstawiono w rozdziale 8.

6.2. NWA 6410

Nie jest znana dokładna data spadku meteorytu NWA 6410 na Ziemię. Odnaleziony został w północno-zachodniej Afryce, a następnie zakupiony w Maroku. Odnaleziono 10 fragmentów tego meteorytu o łącznej masie 10 kg. Sklasyfikowany został jako chondryt zwyczajny L6, S2, W1 (Ruzicka i in., 2014).

Do badań przeznaczono 222 g meteorytu NWA 6410. Zakup meteorytu dla Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej został sfinansowany ze środków przyznanych na badania statutowe wydziału prowadzone w Zakładzie Geologii i Wód Mineralnych.

Ze względu na to, że minerały rudne będą dokładnie charakteryzowane w rozdziale 8, to aby tej charakterystyki mineralogiczno-petrograficznej nie rozdzielać na dwie części, kompleksową charakterystykę mineralogiczno-petrograficzną meteorytu przedstawiono w rozdziale 8.

7. Metody badań

7.1. Wstęp

Określenie możliwości pozyskiwania wybranych surowców metalicznych ze skał chondrytowych jest procesem złożonym. Można wyszczególnić trzy główne etapy badań: przygotowanie danych ilościowych i jakościowych dotyczących analizowanych faz mineralnych w skale, przygotowanie próbek do testów przeróbczych oraz testy przeróbcze wraz z analizą uzyskanych wyników.

W pierwszym etapie przy użyciu mikroskopu petrograficznego ustalany jest skład mineralny badanej skały, a także określane są wielkości występujących w nich ziaren stopu FeNi (będących celem wzbogacania). Określana jest również wielkość ziaren troilitu (będących składnikiem obniżającym jakość koncentratu) i ewentualnie innych minerałów zawierających cenne pierwiastki – metale (np. chromit). Dzięki temu możliwe jest dobranie metody kruszenia oraz mielenia próbki, a także ocena tego procesu. Badania te dają także informację o zawartości objętościowej wybranych składników w badanej skale.

Drugi etap to przygotowanie próbek do testów przeróbczych. Podczas tego etapu skała rudonośna jest kruszona, a następnie mielona w celu uwolnienia ziaren mineralnych. W przypadku tej pracy, szczególnie istotne jest uwolnienie ziaren stopu FeNi od minerałów krzemianowych, zubożających koncentrat, a także od ziaren troilitu, który zubaża, a także pogarsza jakość koncentratu. Próbki otrzymane w wyniku procesów rozdrabniania skały są następnie poddawane analizie sitowej, a wydzielone frakcje po analizie sitowej są następnie poddawane analizie QEMScan, dającej informację dotyczącą zawartości poszczególnych faz mineralnych, a także niezwykle istotnego dla dalszego doboru metod przeróbczych, stopnia uwolnienia.

Trzeci etap badań to eksperymenty związane z przeróbką rud chondrytowych. Składają się na niego przeprowadzone testy oraz analiza uzyskanych w ich trakcie koncentratów i odpadów. Ten etap ostatecznie odpowiada na pytanie, czy dany proces przeróbczy może mieć znaczenie przy pozyskiwaniu tego typu surowca z rud chondrytów. Po zestawieniu wszystkich wyników można także określić najbardziej efektywny proces przeróbczy dla tego typu złóż.

7.2. Mikroskop petrograficzny oraz mikroskop stereoskopowy

Do badań zostały wykorzystane: mikroskop polaryzacyjny Nikon ECLIPSE LV100POL wyposażony w kamerę Nikon DS-Ri1 (rysunek 7.1), mikroskop stereoskopowy Nikon SMZ 1500 wyposażony w kamerę Nikon DS-Fi2 (rysunek 7.2) oraz program do analizy obrazu NIS-Elements BR 4.00.00. Analizy mikroskopowe zostały wykonane w celu określenia wielkości ziaren stopu FeNi oraz troilitu w skale, a także w celu określenia ich zawartości objętościowej w skale rudnej. Badaniom poddane były próbki w formie cienkich płytek, wyciętych bezpośrednio z badanych meteorytów, a następnie zeszlifowanych i wypolerowanych. W tak przygotowanych próbkach, podczas analizy mikroskopowej w świetle odbitym można zidentyfikować i odróżnić od siebie minerały stopu FeNi (jasne, białe ziarna – większa zdolność refleksyjna) oraz troilitu (ciemniejsze, żółte ziarna – mniejsza zdolność refleksyjna). Możliwa jest także identyfikacja ziaren chromitu (ciemniejsze, szare ziarna). Zdjęcia były wykonywane przy powiększeniu 25x (2,5x powiększenie obiektywu oraz 10x powiększeniu okularu).



Rysunek 7.1. Mikroskop petrograficzny użyty w badaniach



Rysunek 7.2. Mikroskop stereoskopowy użyty w badaniach

Pojedyncze wykonywane zdjęcia zostały połączone w jedną całość i w tej formie podlegały dalszym analizom. Proces pomiaru dla ziaren stopu FeNi oraz troilitu odbywał się oddzielnie. Pomiar pojedynczego ziarna wymagał w pierwszej kolejności jego poprawnego zidentyfikowania. W następnym kroku należało zaznaczyć kontur badanego ziarna. Chociaż

program NIS-Elements posiada funkcję automatycznego identyfikowania konturu, w wielu przypadkach, zwłaszcza w przypadku troilitu, należało określić go ręcznie. Po wprowadzeniu konturu na obrazie i zatwierdzeniu go prawym przyciskiem myszy program, na podstawie wcześniej kalibracji obrazu, obliczał powierzchnię zaznaczonego minerału, a także jego średnicę ekwiwalentną. W podobny sposób zmierzona została także powierzchnia całej analizowanej płytki meteorytu, której wymiary mieściły się w zakresie 41-46 mm na 22-28 mm.

Na podstawie wykonanych pomiarów i uzyskanych danych, wyeksportowanych z programu NIS-Elements do arkusza kalkulacyjnego excel, możliwe było określenie zawartości poszczególnych faz mineralnych w objętości badanego meteorytu. Zakładano przy tym jednorodny rozkład w przestrzeni ziaren stopu FeNi i FeS (chondryty są obiektami niezdyferencjonowanymi, które charakteryzują się bardzo małą zmiennością w rozkładzie minerałów w całej swej objętości). Ponadto umożliwiło to określenie składu ziarnowego stopu FeNi oraz troilitu, przedstawionego w postaci krzywych składu ziarnowego.

7.3. Analiza chemiczna oraz mineralna rudy chondrytowej

Badania składu mineralnego oraz chemicznego w mikroobszarze były prowadzone przy wykorzystaniu mikrosondy elektronowej CAMECA SX-Five FE (rysunek 7.3). Badania prowadzone były na próbkach w formie cienkich, odkrytych płytek, wyciętych bezpośrednio z badanych meteorytów, a następnie zeszlifowanych, wypolerowanych oraz napylnych węglem. Płytki meteorytu miały wymiary w zakresie 41-46 mm na 22-28 mm.



Rysunek 7.3. Mikrosonda elektronowa wykorzystana do badań

W ramach przeprowadzonych analiz badany był skład chemiczny poszczególnych faz mineralnych występujących w analizowanej rudzie. Były to przede wszystkim będące przedmiotem tej pracy minerały stopu FeNi: kamacyt, taenit oraz tetrataenit. Analizie chemicznej poddano także inne ziarna: krzemiany (oliwiny, pirokseny, skalenie), troilit, chromit, fosforany (apatyt oraz merilit). Analizy wykonane były przy średnicy wiązki 2 μm , napięciu przyspieszającym 20 kV oraz intensywności wiązki 20 nA.

Ponadto wykonano analizy WDS wybranych minerałów, zdjęcia BSE (ang. *Back-scattered electrons* – elektrony wstecznie rozproszone) oraz mapy pierwiastkowe obrazujące rozkład pierwiastków w analizowanych ziarnach mineralnych.

7.4. Procesy kruszenia oraz mielenia skały rudnej

7.4.1. Tamdakht

Aby przeprowadzić jakiegokolwiek procesy wzbogacania, w tym przypadku wzbogacania żelaza oraz niklu, konieczne było wcześniejsze przygotowanie materiału do testów poprzez rozdrobnienie skały chondrytowej dla uwolnienia minerałów stopu FeNi, a także troilitu. W tym celu skała rudna została poddana kilku procesom.

W pierwszym etapie skała została pocięta na cieńsze płytki (3 mm), tak aby ułatwić jej kruszenie. W tym celu wykorzystana została diamentowa piła tarczowa chłodzona wodą. Pocięte płytki zostały wysuszone, tak aby nie zachodziły procesy wietrzenia minerałów stopu FeNi. Płytki miały wymiary ok 46 mm na 28 mm.

W drugim etapie przygotowane wcześniej płytki zostały poddane kruszeniu w kruszarce szczękowej Retsch BB 51 (rysunek 7.4) wyposażonej w okładziny cyrkonowe. Przygotowane w ten sposób próbki były kierowane dalej do mielenia.



Rysunek 7.4. Kruszarka szczękowa wykorzystana do badań

W trzecim etapie, próbki skały po kruszeniu były mielone w młynie kulowym Retsch PM 100 (rysunek 7.5) przy użyciu kul z tlenku glinu. Mielenie trwało 60 sekund, przy 600 obrotach na minutę. Tak pozyskana próbka była następnie kierowana na analizę sitową.



Rysunek 7.5. Młyn kulowy wykorzystany do badań

W czwartym etapie mielono ręcznie przy użyciu moździerza agatowego frakcję powyżej 100 μm uzyskaną w wyniku analizy sitowej. Domielona w ten sposób próbka była następnie ponownie kierowana do analizy sitowej. Proces ten powtarzano do momentu, gdy różnica pomiędzy masą frakcji powyżej 100 μm przed mieleniem w moździerzu agatowym i po wynosiła poniżej 10%.

7.4.2. NWA 6410

Do rozdrobnienia rudy chondrytowej grupy L reprezentowanej przez chondryt NWA 6410 wykorzystano trzy metody. Zostało to wykonane przede wszystkim w celu określenia możliwości rozdrobnienia także ziaren stopu FeNi. W metodach tych materiał został wstępnie pocięty na cieńsze płytki przy użyciu diamentowej piły tarczowej chłodzonej wodą, a następnie skruszony w kruszarce szczękowej Retsch BB 51. Płytki miały wymiary ok 46 mm na 28 mm.

Mielenie w pierwszej metodzie zostało wykonane przy wykorzystaniu urządzenia Retsch Cryomill wyposażonego w stalowy młyn kulowy o pojemności 50 ml oraz 4 stalowe kule o średnicy 15 mm. W urządzeniu tym możliwe jest utrzymywanie stałej temperatury na poziomie -196°C dzięki automatycznemu chłodzeniu ciekłym azotem przed, jak i w trakcie mielenia. Warunki te pozwoliły w pewnym stopniu odzwierciedlić warunki panujące poza Ziemią. Chłodzenie wstępne trwało 12 minut. Następnie mielenie przeprowadzono w 9 cyklach po 2 minuty przy częstotliwości 35 Hz, z 30-to sekundowymi przerwami przeznaczonymi na dodatkowe chłodzenie.

Mielenie w drugiej metodzie zostało wykonane przy wykorzystaniu urządzenia Retsch Vibratory Disc Mill RS 200. Urządzenie to wykorzystuje się do bardzo szybkiego i bezstratnego rozdrabniania przy wykorzystaniu sił nacisku, uderzania oraz tarcia. Mielenie przebiegało przez 8 minut przy 1500 obrotach na minutę.

Mielenie w trzeciej metodzie przebiegło w analogiczny sposób jak w przypadku meteorytu Tamdakht. Wykorzystany został młyn kulowy Retsch PM 100 wraz z kulami z tlenku glinu. Mielenie trwało 60 sekund, przy 600 obrotach na minutę. Zmielona skała następnie była kierowana na analizę sitową i frakcja powyżej 100 μm była mielona do czasu, aż w kolejnych etapach mieleniu poddawało się mniej niż 10% okruchów. Materiał uzyskany tą metodą był kierowany do dalszych badań przeróbczych.

7.5. Analiza sitowa

7.5.1. Tamdakht

Do analizy sitowej wykorzystany został przesiewacz wibracyjny typu WSE (rysunek 7.6). Wykorzystane zostały dwa sита o średnicy oczek 100 μm oraz 500 μm . Analizie sitowej poddane były próbki uzyskane wcześniej w procesie rozdrabniania skały rudnej. Dzięki temu otrzymane zostały trzy frakcje o rozmiarze ziaren poniżej 100 μm , pomiędzy 100 a 500 μm oraz powyżej 500 μm .

Taki dobór frakcji miał swoje podłoże praktyczne. Frakcja o rozmiarze ziaren poniżej 100 μm może być poddawana większości procesów wzbogacania. Frakcja o rozmiarze ziaren pomiędzy 100 a 500 μm może być poddawana niektórym procesom wzbogacania. Frakcja powyżej 500 μm nie może być poddawana większości z podstawowych procesów wzbogacania. Ponadto wszelkie analizy chemiczne tej frakcji są utrudnione.



Rysunek 7.6. Przesiewacz wibracyjny wykorzystany do badań

7.5.2. NWA 6410

Do analizy sitowej materiału rozdrobnionego przy użyciu urządzeń Cryomill oraz Vibratory Disc Mill RS 200 wykorzystany został przesiewacz wibracyjny AS 200 control wyposażony w sito o średnicy oczek 100 μm oraz w 6-cio milimetrowe kule. Do analizy sitowej kierowane były próbki uzyskane wcześniej w procesie rozdrabniania skały rudnej. Dzięki temu otrzymane zostały dwie frakcje o rozmiarze ziaren poniżej 100 μm oraz powyżej 100 μm .

Ruda chondrytowa rozdrobniona przy użyciu urządzenia Retsch PM 100 została poddana analizie sitowej z wykorzystaniem przesiewacza wibracyjnego typu WSE. W wyniku

wykonanej analizy sitowej uzyskano trzy frakcje ziaren: poniżej 100 μm , pomiędzy 100 a 500 μm oraz powyżej 500 μm . Dobór frakcji, tak jak opisano to w rozdziale 7.5.1., wynikał z konieczności dostosowania nadawy do wybranych procesów przerobczych.

7.6. Separacja magnetyczna

Separacja magnetyczna odbyła się na separatorze magnetycznym Frantza. Test ten polegał na odseparowaniu ziaren magnetycznych (ziarna stopu FeNi) od pozostałych minerałów budujących skałę rudną, przede wszystkim troilitu oraz krzemianów.

7.7. Separacja w cieczy ciężkiej

Separacja w cieczy ciężkiej została wykonana przy użyciu wirówki Universal 320. Cieczą ciężką wykorzystaną w tym procesie był poliwolframian sodu ($\text{Na}_6[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}]$) o gęstości 3 g/cm^3 . Do próbki o pojemności 100 cm^3 wsypywano około 5 gramów próbki oraz wlewano 70 cm^3 cieczy ciężkiej. Łączna masa zawartości próbki wynosiła około 150 g. Próbka była wirowana przez 30 minut z prędkością 1900 obr/min. Następnie próbki były odstawione na 24 godziny do całkowitego rozdziału. Po tym czasie oddzielono frakcję lżejszą (pływającą) oraz cięższą (tonącą). Obie frakcje zostały przepłukane na lejku Büchnera wodą destylowaną i wysuszone w temperaturze 65°C.

7.8. Separacja na stole koncentracyjnym

Separacji na stole koncentracyjnym poddana została próbka meteorytu Tamdakht o frakcji pomiędzy 100 μm a 500 μm . Do przeprowadzenia separacji wykorzystany został laboratoryjny stół koncentracyjny z napędem typu Wilfley, z tzw. blatem szlamowym o powierzchni roboczej 0,45 m^2 , firmy Wilfley. W wyniku separacji na stole koncentracyjnym uzyskano dwa produkty: koncentrat oraz odpad.

7.9. Flotacja

Separacji na drodze flotacji poddane zostały próbki meteorytów Tamdakht oraz NWA 6410 o frakcji poniżej 100 μm . Do wykonania flotacji wykorzystano laboratoryjną maszynkę flotacyjną typu Mechanobr wyposażoną w komorę o pojemności 250 cm^3 (Rysunek 7.7). Do flotacji kierowano nadawę o masie 50 g dla meteorytu Tamdakht oraz 100 g dla meteorytu NWA 6410. Użyto wody wodociągowej. Flotacja została wykonana dwoma metodami.

W metodzie pierwszej najpierw do komory flotacyjnej wsypano nadawę oraz dodano wody wodociągowej. Następnie dodawano odczynniki. Najpierw dodano siarczan(VI) miedzi (CuSO_4) w dawce 150 g/Mg i mieszano zawartość komory przez 5 minut. Następnie w celu obniżenia pH roztworu do wartości około 5,5 dodawano kwas siarkowy(VI) (H_2SO_4) i kontrolowano pH przy użyciu pehametru. Następnie dodano zbieracza – amyłowego ksantogenianu potasu (PAX) w dawce 150 g/Mg i roztwór mieszano przez dwie minuty. Następnie dodano spieniacza – roztworu metyloizobutylokarbinolu (MIBC) w dawce 40 g/Mg i mieszano przez minutę. Po tym czasie otworzono dopływ powietrza i zbierano pianę do czasu aż stała się jasna.



Rysunek 7.7. Laboratoryjna maszynka flotacyjna typu Mechanobr.

W metodzie drugiej najpierw do komory flotacyjnej wsypano nadawę oraz dodano wody wodociągowej. Następnie dodawano odczynniki. Jako pierwszy dodano zbieracz – chlorowodorek dodecyloaminy (DDA) w dawce 300 g/Mg i mieszano przez 5 minut. Następnie dodano speniacz – roztwór metyloizobutylokarbinolu (MIBC) w dawce 40 g/Mg i mieszano przez minutę. Po tym czasie otworzono dopływ powietrza i zbierano pianę do czasu aż stała się jasna.

W wyniku flotacji uzyskano dwa produkty – koncentrat oraz odpad. Produkty zostały odsączone przy użyciu kolby Büchnera, a następnie wysuszone w piecu.

Uzyskane produkty flotacji zostały następnie przekazane do laboratoriów zewnętrznych w celu wykonania analizy składu mineralnego oraz uśrednionego składu chemicznego całej skały. W Laboratorium Badań Struktury i Właściwości Materiałów należącego do Sieci Badawczej Łukasiewicz – PORT Polski Ośrodek Rozwoju Technologii wykonano analizę QEMSCAN wraz z preparatyką z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego Quanta 650 FEG. W laboratoriach Bureau Veritas w Kanadzie wykonano badania geochemiczne składu pierwiastkowego produktów wzbogacania z wykorzystaniem analiz ultra-trace ICP-ES/MS, aqua regia ICP-ES (przygotowanie próbki z wodą królewską), Peroxide Fusion ICP-ES (przygotowanie próbki z fuzją nadtlenu) oraz miareczkowania żelaza.

7.10. Analiza mineralna produktów procesów przeróbczych

Analizy stopnia uwolnienia minerałów w wyniku procesów rozdrabniania skały rudnej, a przy okazji także składu mineralnego, wykonywane były w Laboratorium Badań Struktury i Właściwości Materiałów należącego do Sieci Badawczej Łukasiewicz – PORT Polski Ośrodek Rozwoju Technologii przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego Quanta 650 FEG metodą QEMScan. Jest to skrót od angielskiej nazwy „*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*” czyli jest to ilościowa ocena minerałów przy wykorzystaniu skaningowej mikroskopii elektronowej. Jest to w pełni zautomatyzowany system mikroanalizy. Prócz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) ze źródłem wiązki elektronów

wykorzystuje także spektrometry rentgenowskie z dyspersją energii (EDS). Identyfikacja minerałów zawartych w próbkach odbywa się na podstawie analizy widm wtórnej emisji promieniowania rentgenowskiego (Ayling i in., 2012).

Analizowane osobno były frakcje o wielkości ziaren poniżej oraz powyżej 100 µm. Dzięki temu uzyskiwane były dane dotyczące stopnia uwolnienia, a zatem możliwości poddawania przygotowanych prób (nadawy) procesom wzbogacania, przy których liczyły się właściwości powierzchniowe minerałów. Również na podstawie stopnia uwolnienia, a tym samym także informacji o zrostach z innymi minerałami, uzyskane zostały cenne informacje dotyczące potencjalnej czystości otrzymanego koncentratu.

7.11. Analiza chemiczna produktów procesów przeróbczych

Analizę składu chemicznego produktów procesów przeróbczych wykonano w laboratoriach Bureau Veritas w Kanadzie. Metoda ICP-MS to spektrometria mas sprzężona z plazmą wzbudzaną indukcyjnie (ang. *Inductively coupled plasma – mass spectrometry*). Natomiast metoda ICP-OES to optyczna spektrometria emisyjna (ang. *Inductively coupled plasma – optical emission spectrometry*). Metody te pozwalają na wykrywanie pierwiastków, przede wszystkim metali, o bardzo małych koncentracjach. Do badań wszystkich próbek wykorzystano analizę Ultra-trace ICP-ES/MS (MA250). W wykorzystanej metodzie odpowiednio przygotowana próba o masie 0,25 g jest podgrzewana w kwasach HNO₃, HClO₄ oraz HF do momentu, gdy zacznie dymić, a następnie jest suszona. Pozostałości są rozpuszczane w kwasie HCl. Metoda ta pozwala na oznaczanie 59 pierwiastków.

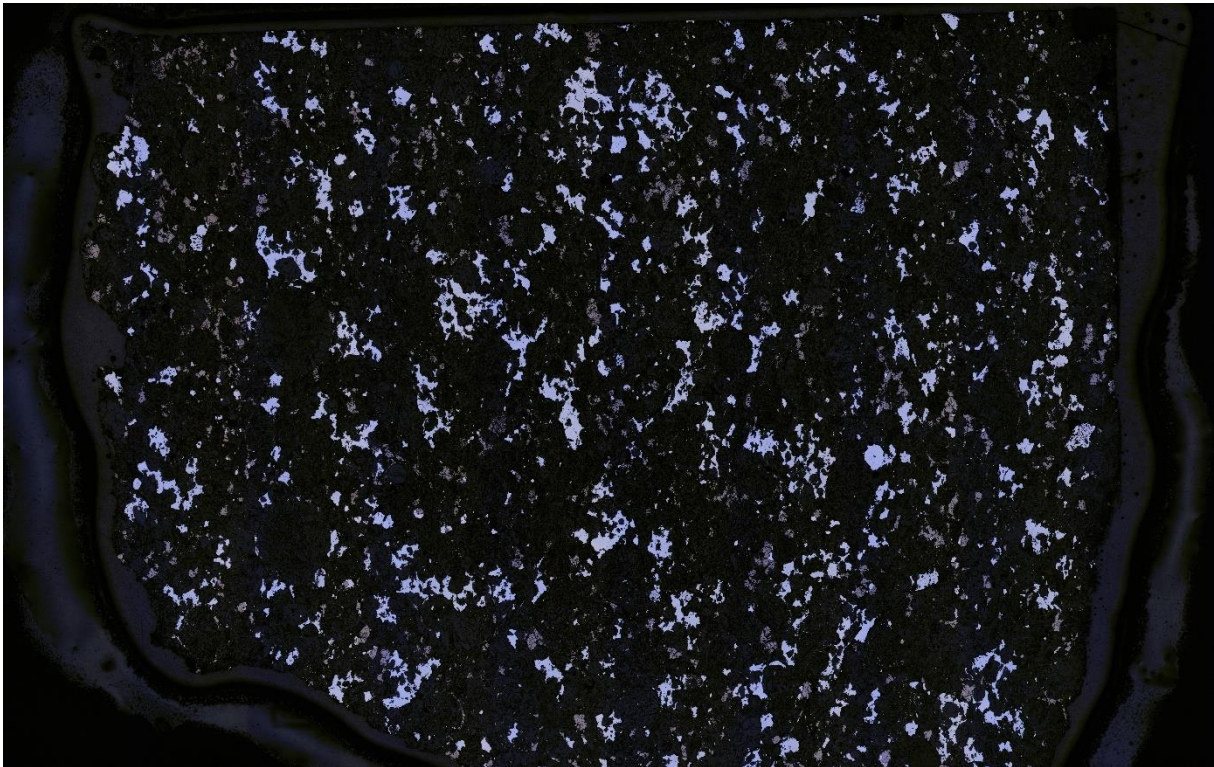
W niektórych przypadkach (5 analiz dla niklu, 2 analizy dla żelaza i 1 dla kobaltu) uzyskany wynik był powyżej limitu detekcji i dla pierwiastków tych wykonano analizy dodatkowe. Wykorzystano w tym celu analizę ICP-ES w dwóch wariantach przygotowania próbek: aqua regia ICP-ES (AQ370), w której to próbka rozpuszczana była w wodzie królewskiej (dwie analizy zawartości niklu) oraz Peroxide Fusion ICP-ES (PF370), w której następuje fuzja nadtlenku sodu do ogniotrwałych rud mineralnych. Proces ten zapewnia całkowite rozpuszczenie większości minerałów, w tym krzemianów (trzy analizy zawartości niklu oraz jedna kobaltu). Zawartość żelaza dla dwóch próbek, z uwagi na dużą koncentrację, określona została metodą miareczkowania (GC818).

8. Wyniki badań

8.1. Analiza składu mineralnego i ziarnowego (badania mikroskopowe)

8.1.1. Tamdakht

Na podstawie badań mikroskopowych uzyskano dane ilościowe dotyczące objętościowej zawartości ziaren stopu FeNi oraz troilitu, a także wykonano zdjęcia wybranych faz mineralnych obecnych w chondrycie Tamdakht. Wykonano również zdjęcie mikroskopowe całej płytki cienkiej poddanej analizie (Rysunek 8.1).

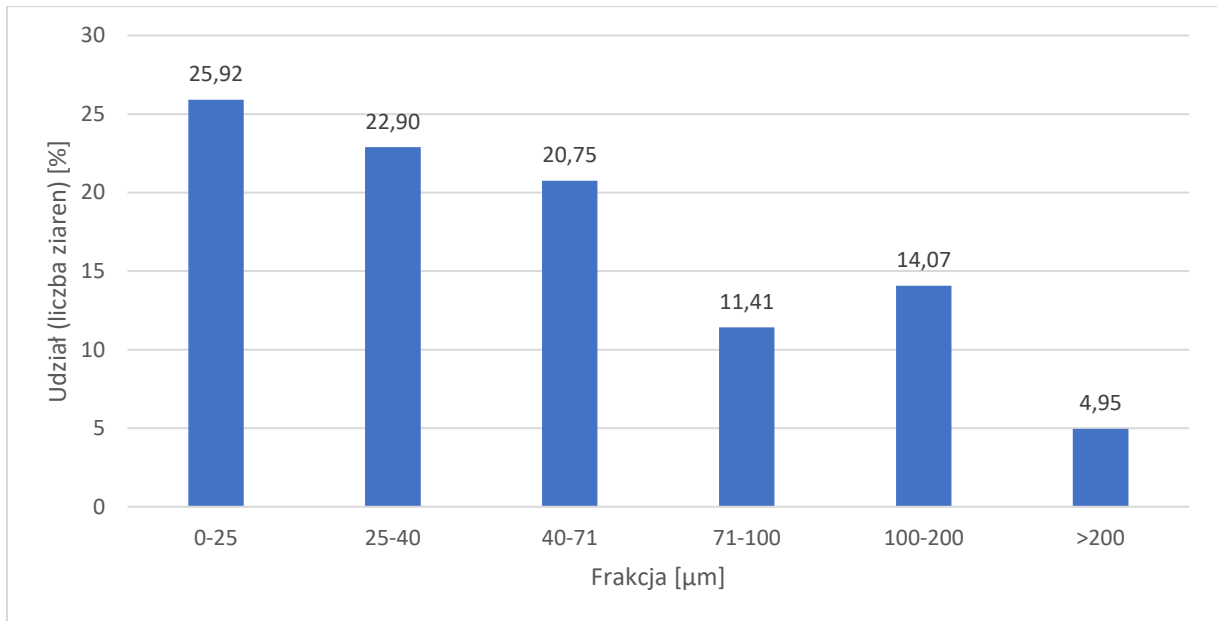


Rysunek 8.1. Obraz mikroskopowy płytki cienkiej uzyskanej z chondrytu Tamdakht

Stop FeNi

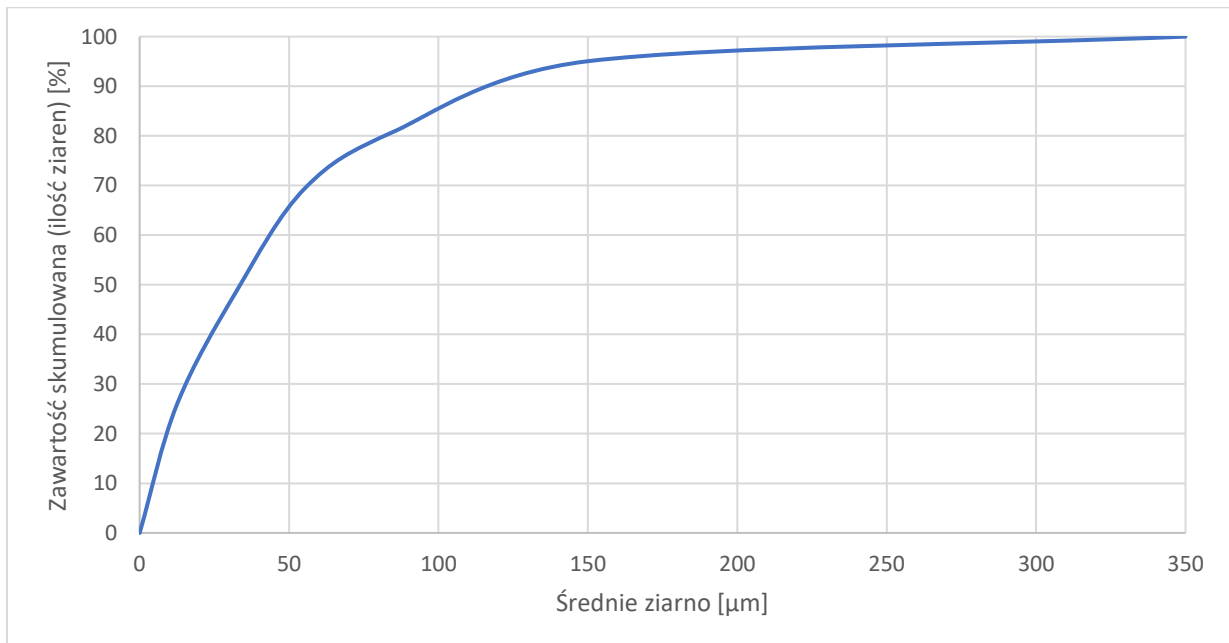
Obliczona zawartość objętościowa ziaren stopu FeNi to 7,57%. Na podstawie pomiarów średnic ekwiwalentnych ziaren stopu FeNi utworzono wykresy (Rysunek 8.2 oraz 8.3). Wykresy te odnoszą się do ilości ziaren w danym przedziale wielkości (jako wielkość ziarna przyjęto jego średnicę ekwiwalentną – średnica hipotetyczna ziarna, przy zachowaniu powierzchni i gęstości ziarna, lecz przy założeniu kształtu okrągłego). Na rysunku 8.2 przedstawiono udział ilościowy ziaren w przedziałach typowych dla wielkości oczek w sitach służących do analizy sitowej. Zauważalna jest tendencja, że ilość ziaren mniejszych jest większa niż ziaren większych. Dane podane dla frakcji 0-25 μm są bardzo mocno niedoszacowane z uwagi na możliwość zliczania tych najmniejszych ziaren. Przy powiększeniu 25x możliwa była identyfikacja i pomiar ziaren o średnicy powyżej 10 μm . Gdyby badania prowadzić przy powiększeniu 40x możliwy byłby pomiar ziaren o średnicy powyżej 5 μm i udział ziaren frakcji 0-25 μm wzrósłby znacznie (do powyżej 80%). Jednak ich udział masowy

w rudzie chondrytowej jest bardzo mały. Największe pomierzone ziarno stopu FeNi miało powierzchnię $0,17 \text{ mm}^2$ oraz średnicę ekwiwalentną równą $497 \mu\text{m}$.



Rysunek 8.2. Udział ziaren FeNi (ich liczby) poszczególnych frakcji w meteorycie Tamdakht

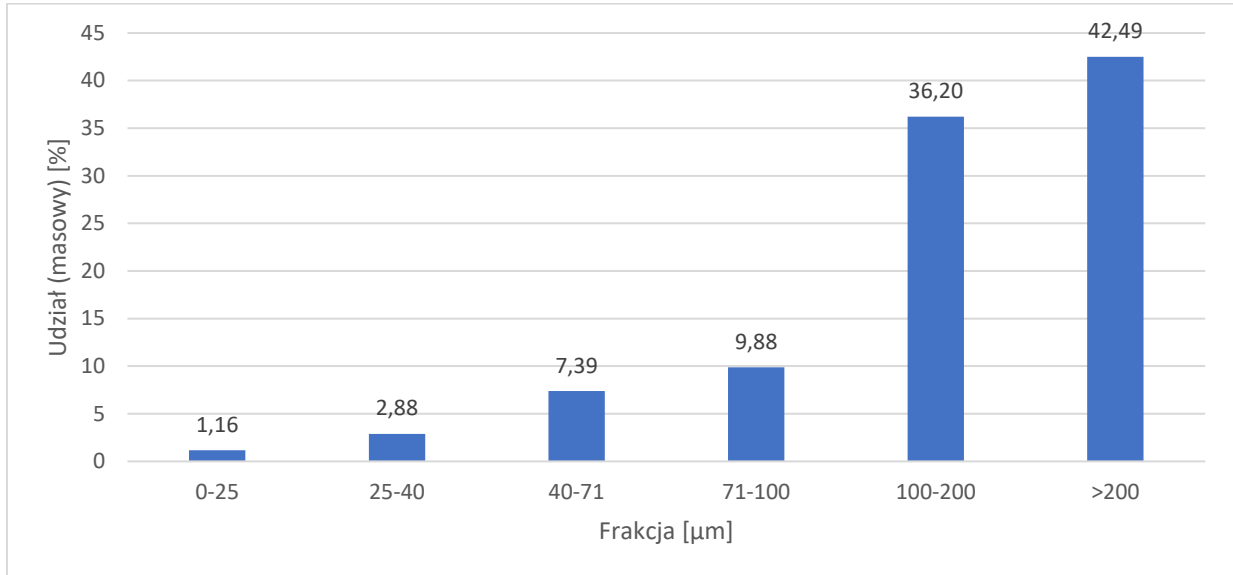
Rysunek 8.3 przedstawia krzywą skumulowaną składu ziarnowego minerałów FeNi. Na podstawie wykresu można stwierdzić, że ziarna poniżej $100 \mu\text{m}$, dla których możliwa jest większość procesów przeróbczych, stanowią ponad 80% liczby wszystkich pomierzonych ziaren.



Rysunek 8.3. Krzywa skumulowana składu ziarnowe FeNi w meteorycie Tamdakht

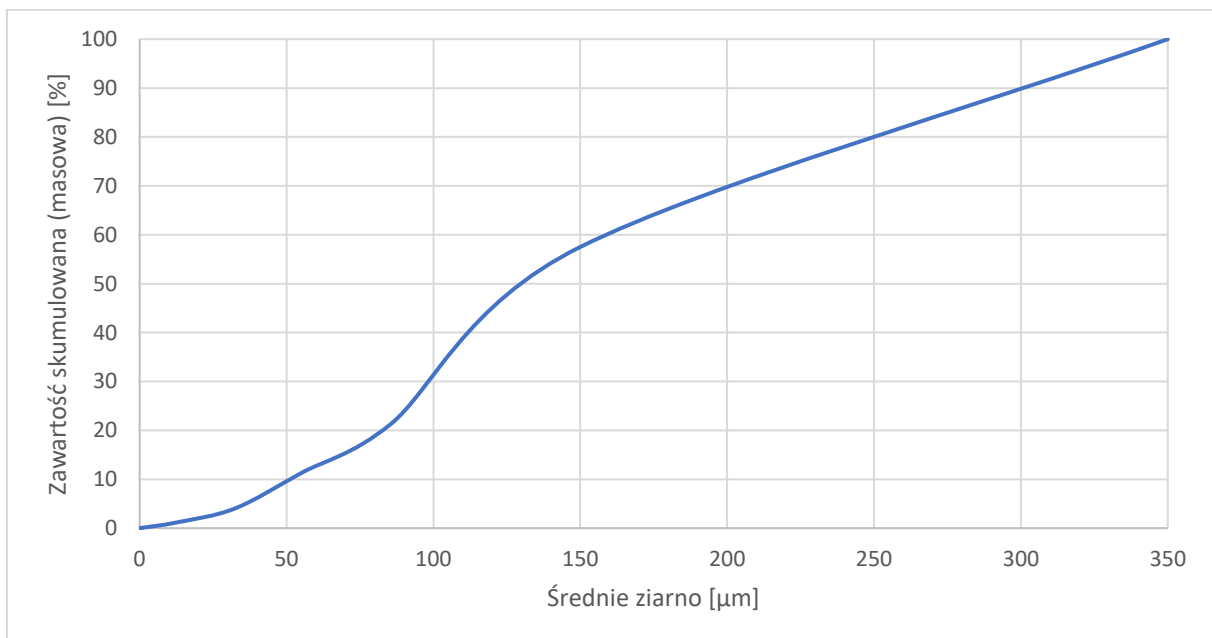
Na rysunkach 8.4 oraz 8.5 przedstawiono wyniki podobnej analizy, ale w odniesieniu do masy, a nie do ilości ziaren. Założono, że ziarna stopu FeNi mają zbliżoną gęstość, w związku z czym możliwe jest przyjęcie wielkości ich powierzchni jako ekwiwalent ich masy.

Rysunek 8.4 przedstawia udział masowy ziaren w przedziałach typowych dla wielkości oczek w sitach służących do analizy sitowej. Na podstawie tego wykresu można stwierdzić, że ziarna o wielkości powyżej 100 μm , mimo iż stanowią 19,02% liczby wszystkich pomierzonych ziaren, stanowią aż 78,69% masy wszystkich ziaren stopu FeNi.



Rysunek 8.4. Udział ziaren FeNi (ich masy) poszczególnych frakcji w meteorycie Tamdakht

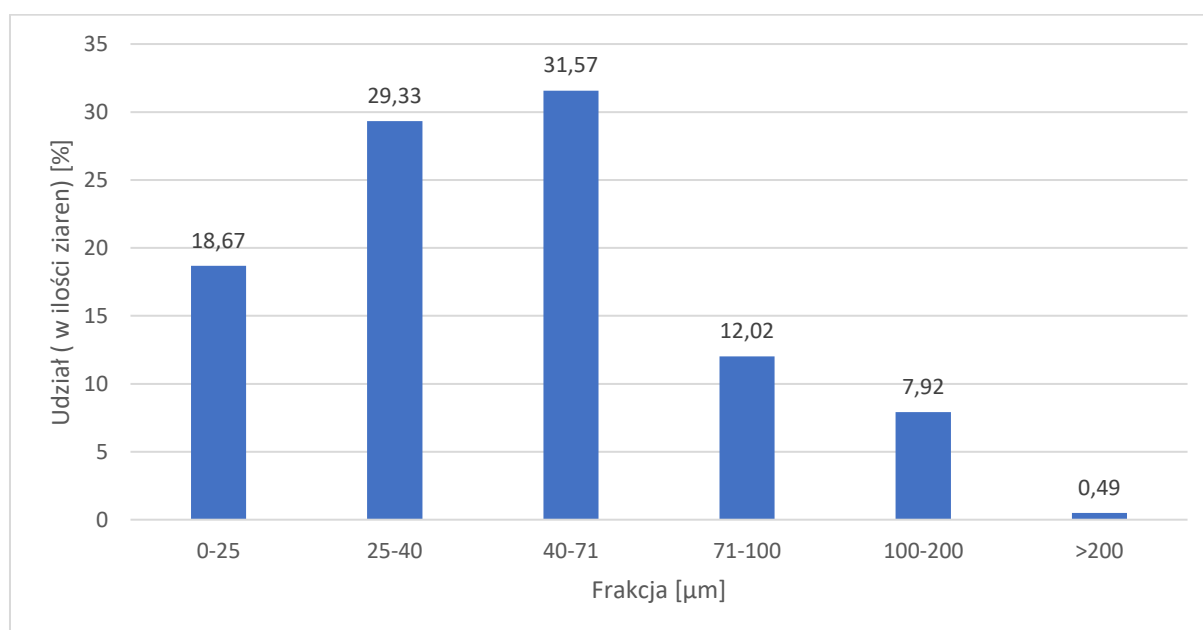
Rysunek 8.5 przedstawia skumulowaną krzywą składu ziarnowego.



Rysunek 8.5. Krzywa skumulowana składu ziarnowego FeNi (masa) w meteorycie Tamdakht

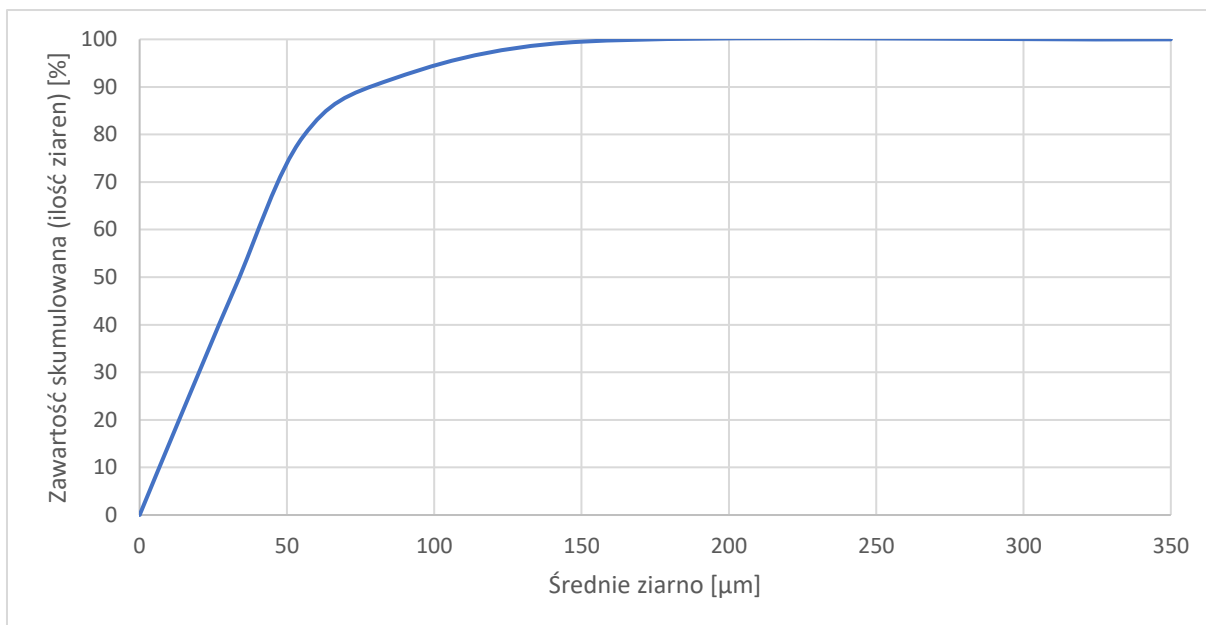
Troilit (FeS)

Dane dla troilitu zostały uzyskane i przedstawione w identyczny sposób jak dla stopu FeNi. Obliczona zawartość objętościowa ziaren troilitu wynosi 2,63%. Na podstawie pomiarów ziaren troilitu utworzono wykresy przedstawione na rysunkach 8.6 oraz 8.7. Wykresy te odnoszą się do ilości ziaren w danym przedziale wielkości (jako wielkość ziarna przyjęto jego średnicę ekwiwalentną). Na rysunku 8.6 przedstawiono udział ilościowy ziaren w przedziałach typowych dla wielkości oczek w sitach służących do analizy sitowej. Mniejszy udział ziaren o średnicy ekwiwalentnej w przedziale 0-25 μm , podobnie jak w przypadku ziaren FeNi, wynika z braku możliwości zliczenia wszystkich ziaren przy przyjętym powiększeniu obrazu pod mikroskopem 25x. Jest to nawet trudniejsze niż w przypadku ziaren FeNi z uwagi na bardziej wygaszoną barwę tych minerałów w świetle odbitym (mniejszą zdolność refleksyjną). Można to zauważyć przy udziale tych ziaren (25,92% w przypadku FeNi, względem 18,67% dla FeS). Przy powiększeniu 25x możliwa była identyfikacja i pomiar ziaren o średnicy powyżej 15 μm . W tym przypadku również nie ma wątpliwości co do tego, że ziaren o najmniejszych średnicach w całej objętości skały rudnej jest najwięcej, jednak ich znaczenie złożowe jest małe. Nie wpływa to jednak na ostateczne wnioski dotyczące doboru możliwych technik przerobczych omawianej rudy. Gdyby badania prowadzić przy powiększeniu 40x możliwy byłby pomiar ziaren o średnicy powyżej 10 μm i udział ziaren frakcji 0-25 μm wzrósłby znacznie (do powyżej 90%). Jednak ich udział masowy w rudzie chondrytowej jest bardzo mały. Największe pomierzone ziarno troilitu miało powierzchnię 0,06 mm^2 oraz średnicę ekwiwalentną równą 278 μm .



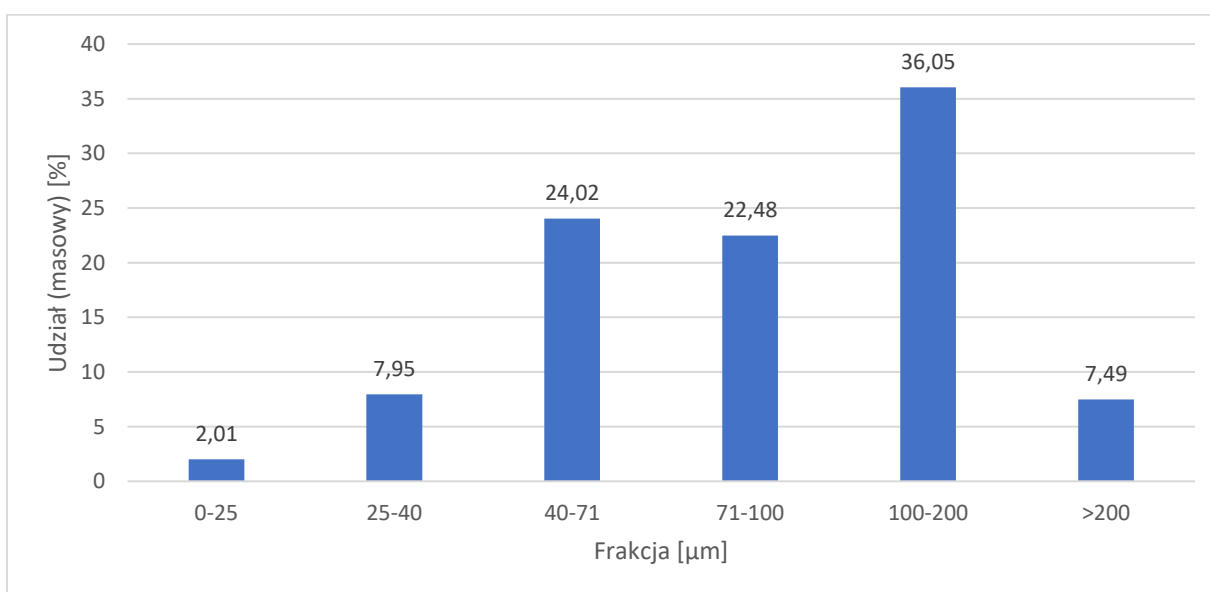
Rysunek 8.6. Udział ziaren troilitu (ich liczby) poszczególnych frakcji w meteorycie Tamdakht

Rysunek 8.7 przedstawia krzywą skumulowaną składu ziarnowego troilitu. Na podstawie wykresu można stwierdzić, że ziarna o średnicy poniżej 100 μm , dla których możliwa jest większość procesów przerobczych, stanowią ponad 91,5% liczby wszystkich pomierzonych ziaren.



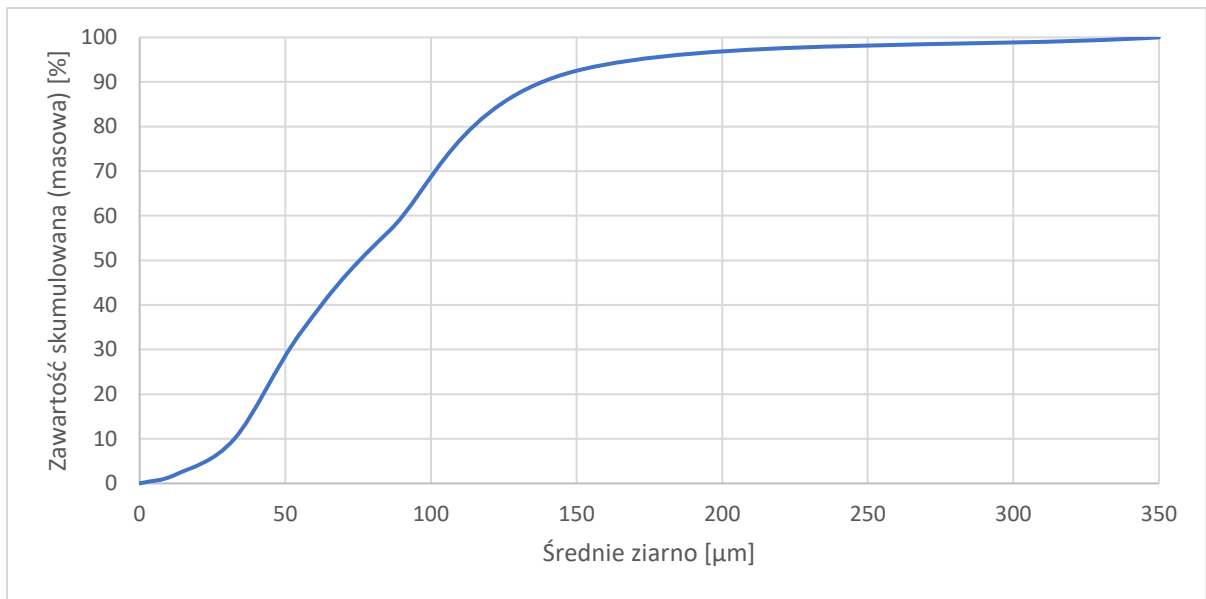
Rysunek 8.7. Krzywa skumulowana składu ziarnowego troilitu w meteorycie Tamdakht

Poniżej, na rysunkach 8.8 oraz 8.9 przedstawiono wyniki podobnej analizy, ale w odniesieniu do masy, a nie do ilości ziaren. Założono, że ziarna stopu FeNi mają zbliżoną gęstość, w związku z czym możliwe jest przyjęcie wielkości ich powierzchni jako ekwiwalentu ich masy. Wykres przedstawiony na rysunku 8.8 pokazuje udział masowy ziaren w przedziałach typowych dla wielkości oczek w sitach służących do analizy sitowej. Na podstawie tego wykresu można stwierdzić, że ziarna o wielkości powyżej 100 µm, mimo iż stanowią około 8,41% liczby wszystkich pomierzanych ziaren, stanowią 43,54% masy wszystkich ziaren siarczku żelaza. Oznacza to, że większość masy troilitu stanowią ziarna o średnicy ekwiwalentnej poniżej 100 µm.



Rysunek 8.8. Udział ziaren troilitu (ich masy) poszczególnych frakcji w meteorycie Tamdakht

Rysunek 8.9 przedstawia krzywą skumulowaną składu ziarnowego, analogicznie do rysunku 8.5.

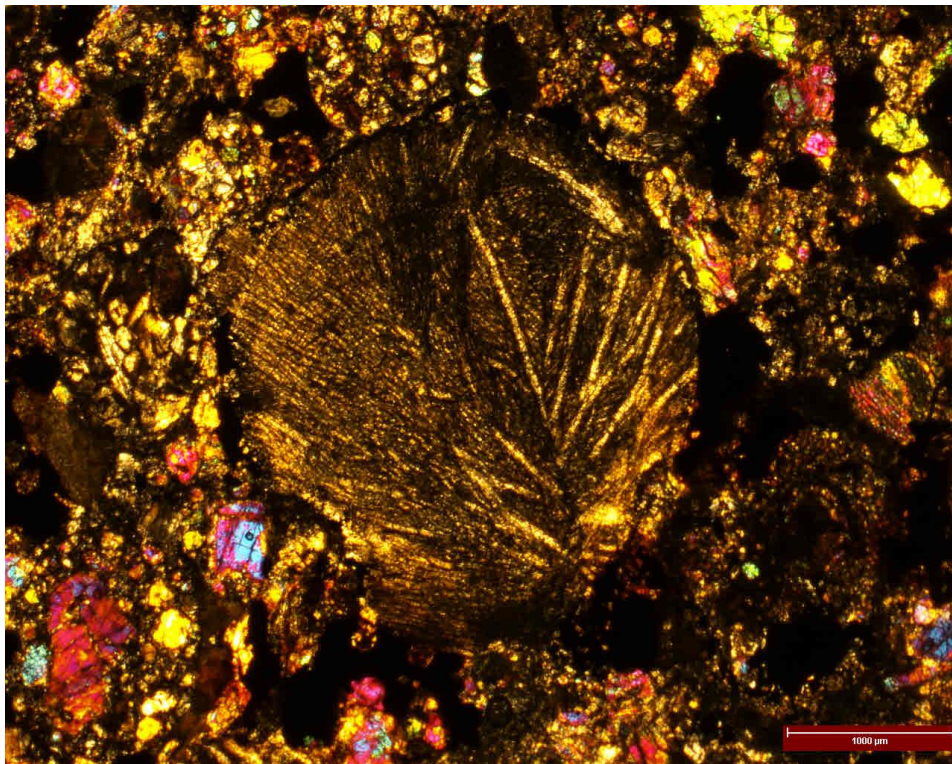


Rysunek 8.9. Krzywa skumulowana składu ziarnowego troilitu (masa) w meteorycie Tamdakht

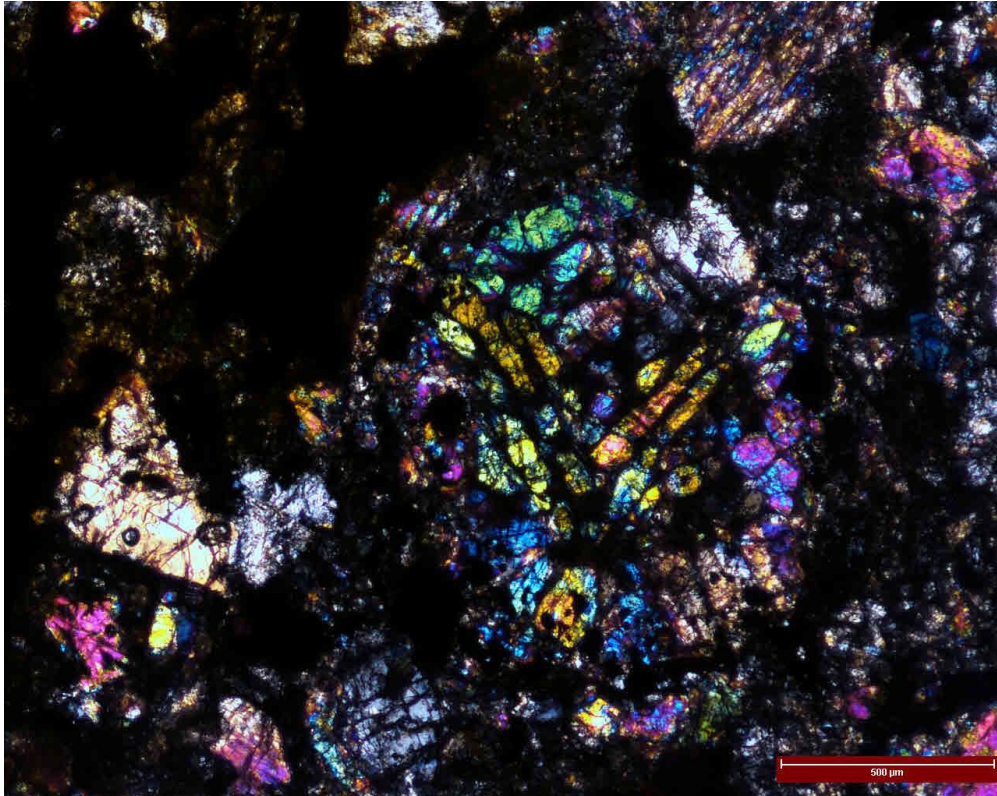
Biorąc pod uwagę, że siarczek żelaza jest w tym przypadku składnikiem niepożądanym, przyjmując ziarno podziałowe na sicie 100 µm, wydaje się teoretycznie możliwe pozbycie się przy kruszeniu i odsianiu ponad 50% ziaren troilitu (FeS). Przy ziarnie podziałowym 150 µm odsianiu ulec mogłoby nawet 80,49% wag. troilitu przy zachowaniu 63,3% wag. stopu FeNi.

Obserwacje mikroskopowe meteorytu Tamdakht

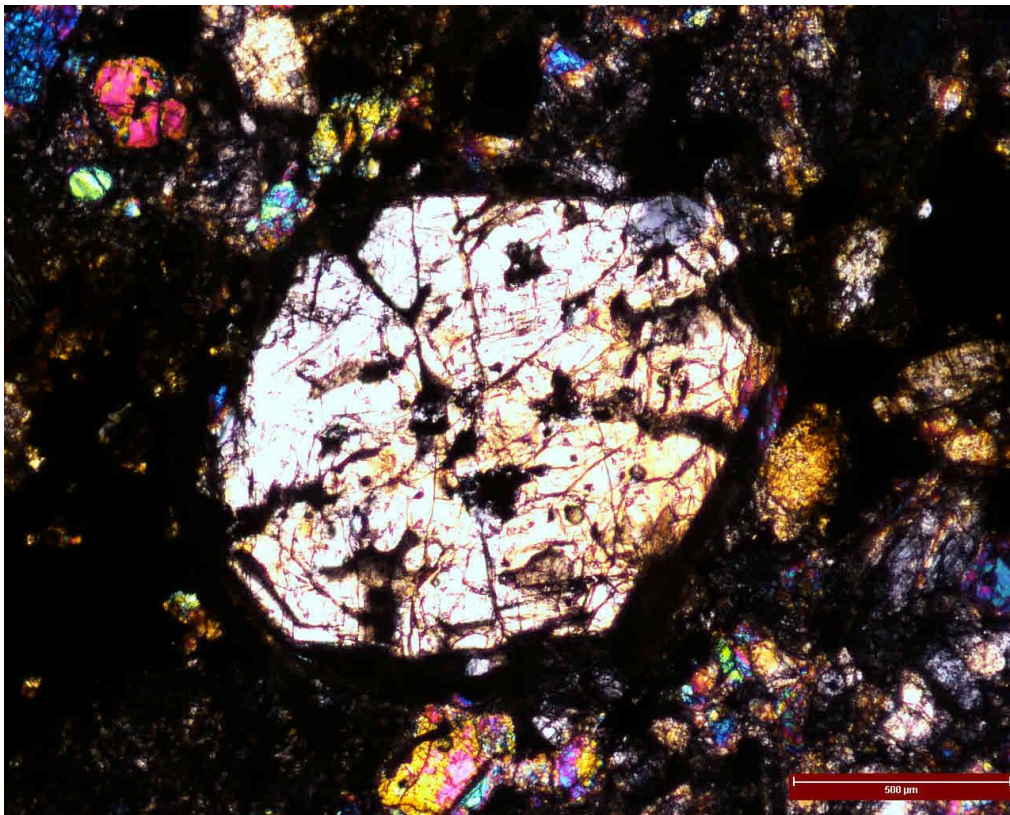
W chondrycie Tamdakht obserwowano liczne chondry (Rysunki 8.10 do 8.14).



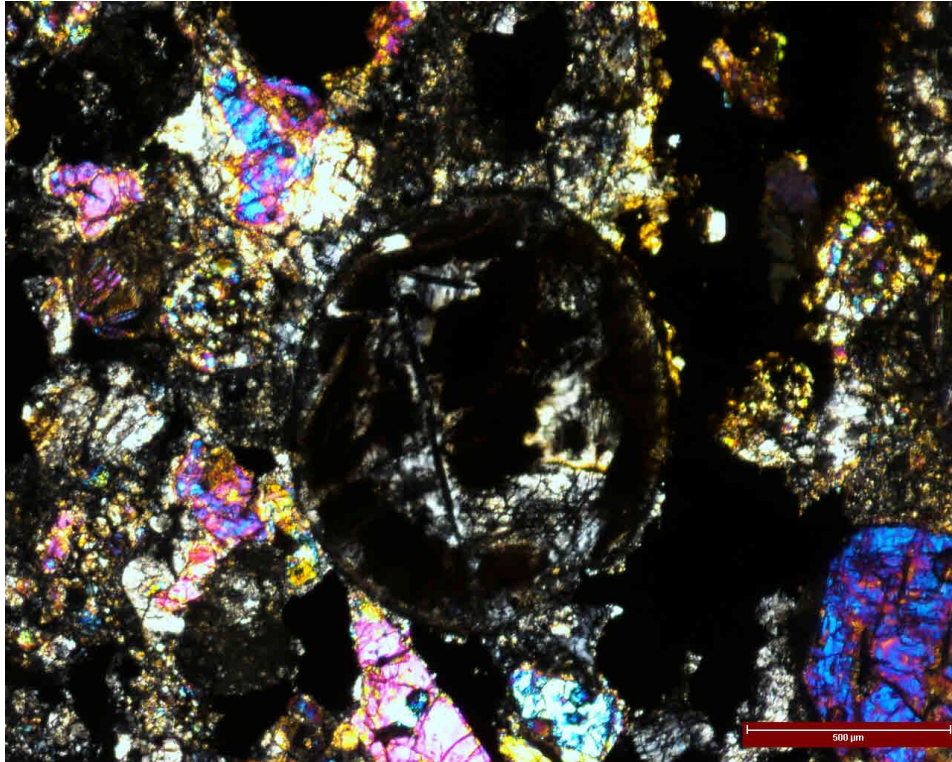
Rysunek 8.10. Chondra piroksenowa promienista w chondrycie Tamdakht



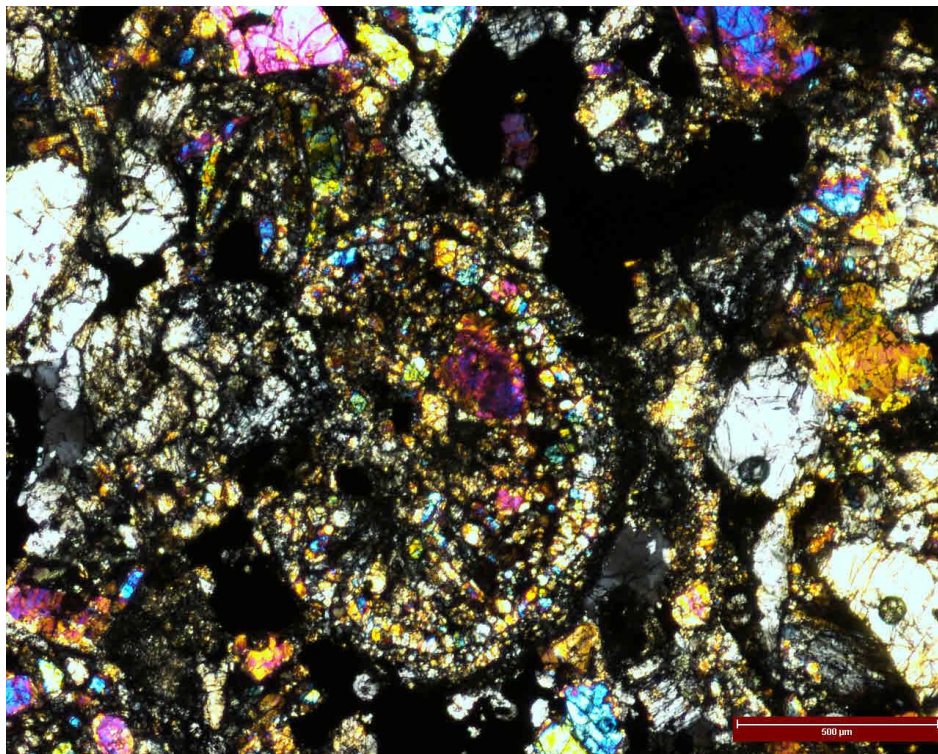
Rysunek 8.11. Chondra oliwinowa porfirowa



Rysunek 8.12. Chondra piroksenowa

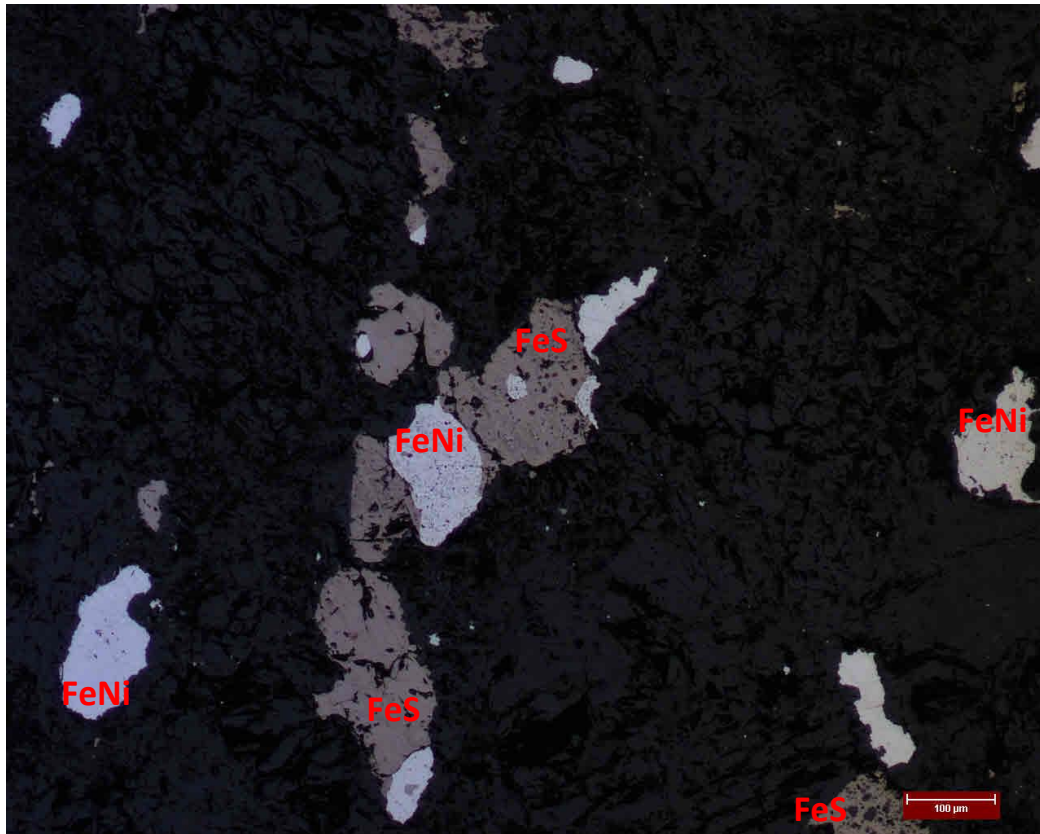


Rysunek 8.13. Chondra szklista, bogata w glin

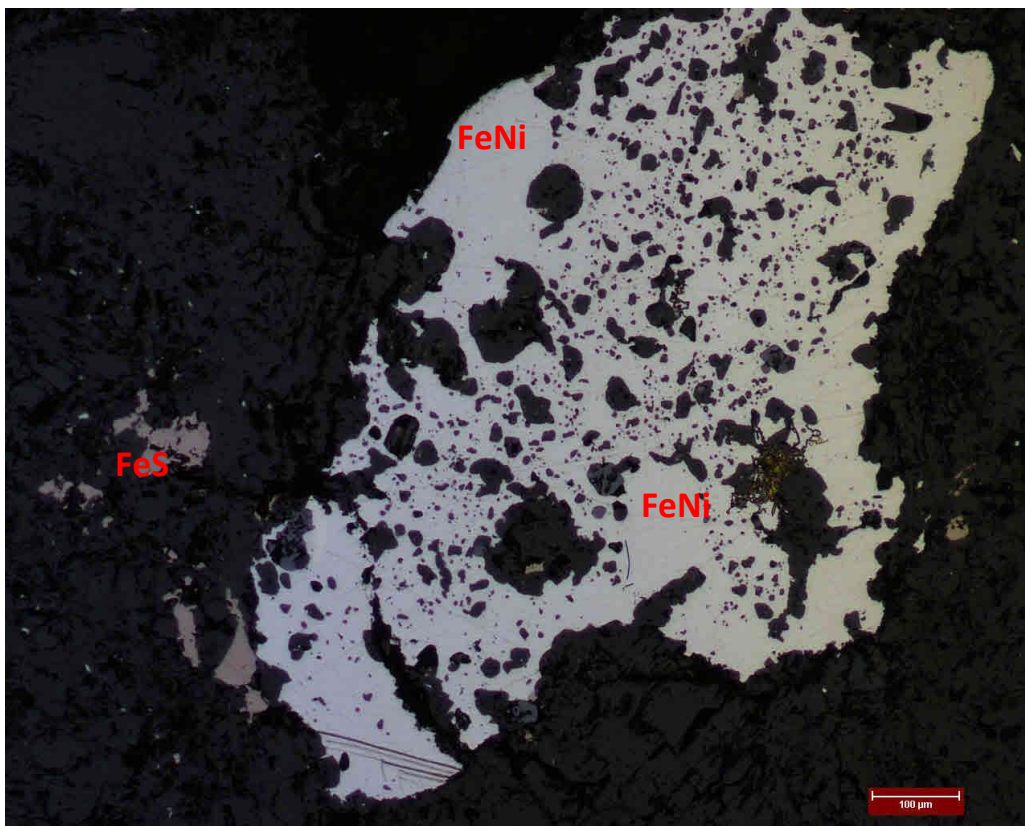


Rysunek 8.14. Chondra porfirowa oliwinowa

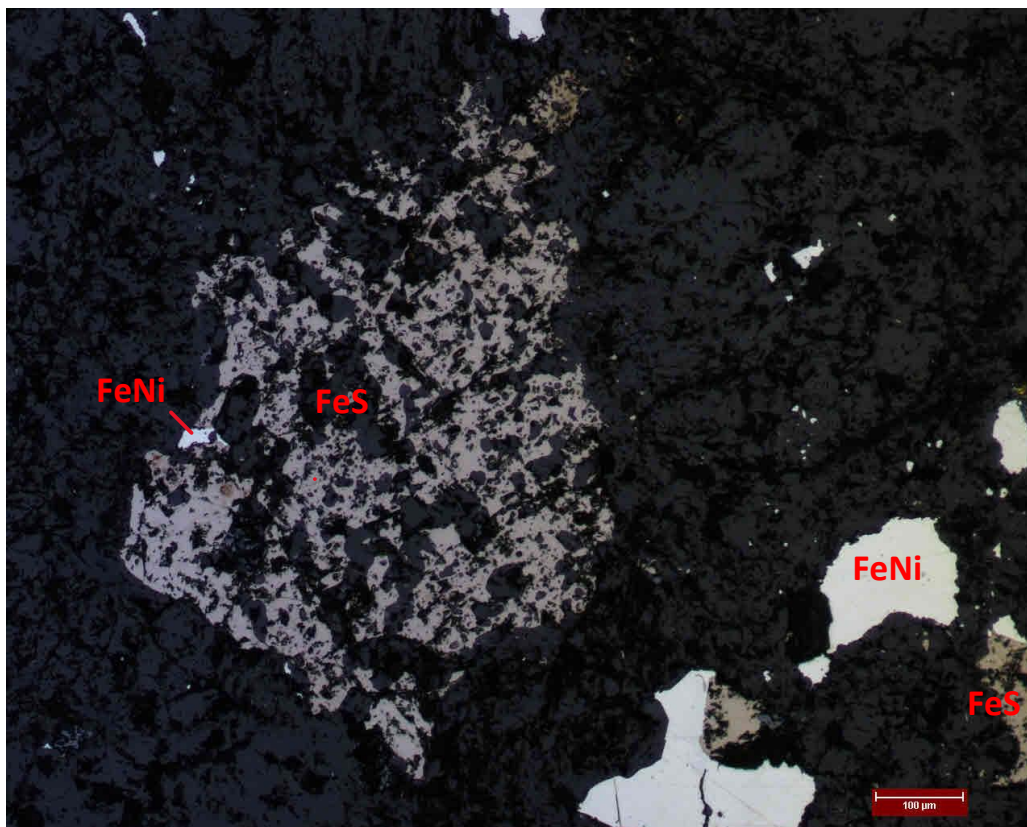
Na rysunkach 8.15 do 8.19 przedstawiono ziarna stopu FeNi, troilitu oraz chromitu.



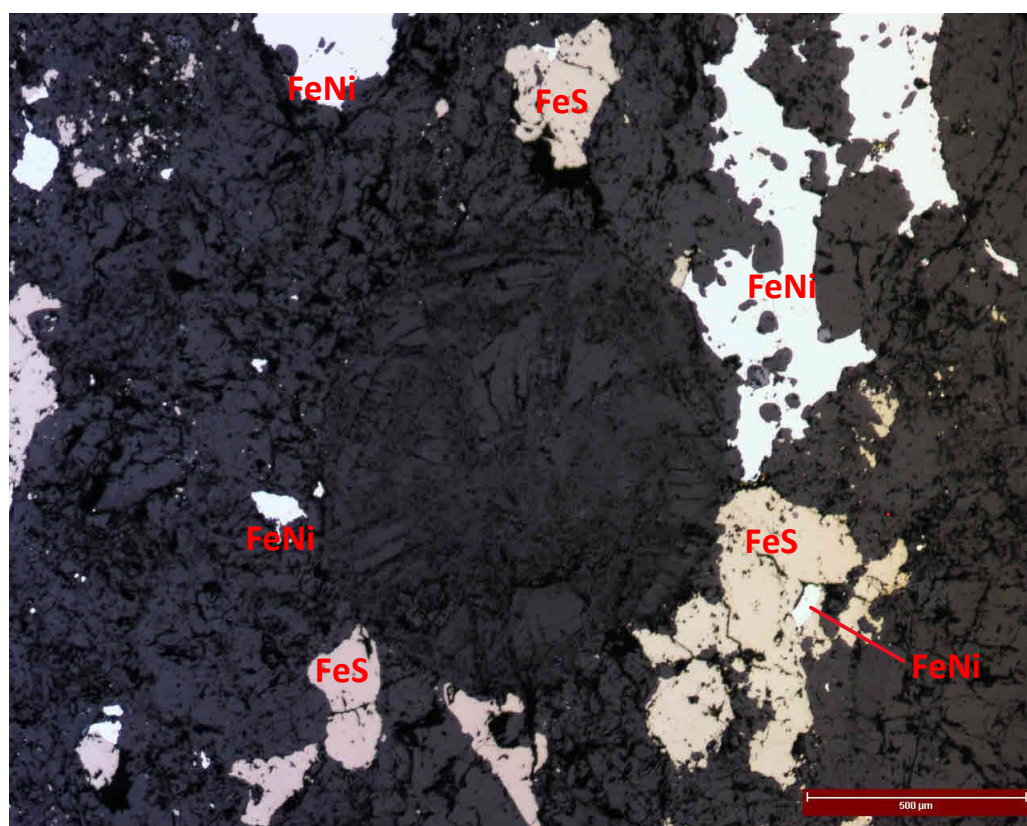
Rysunek 8.15. Ziarna stopu FeNi (jasne) oraz troilitu (ciemniejsze)



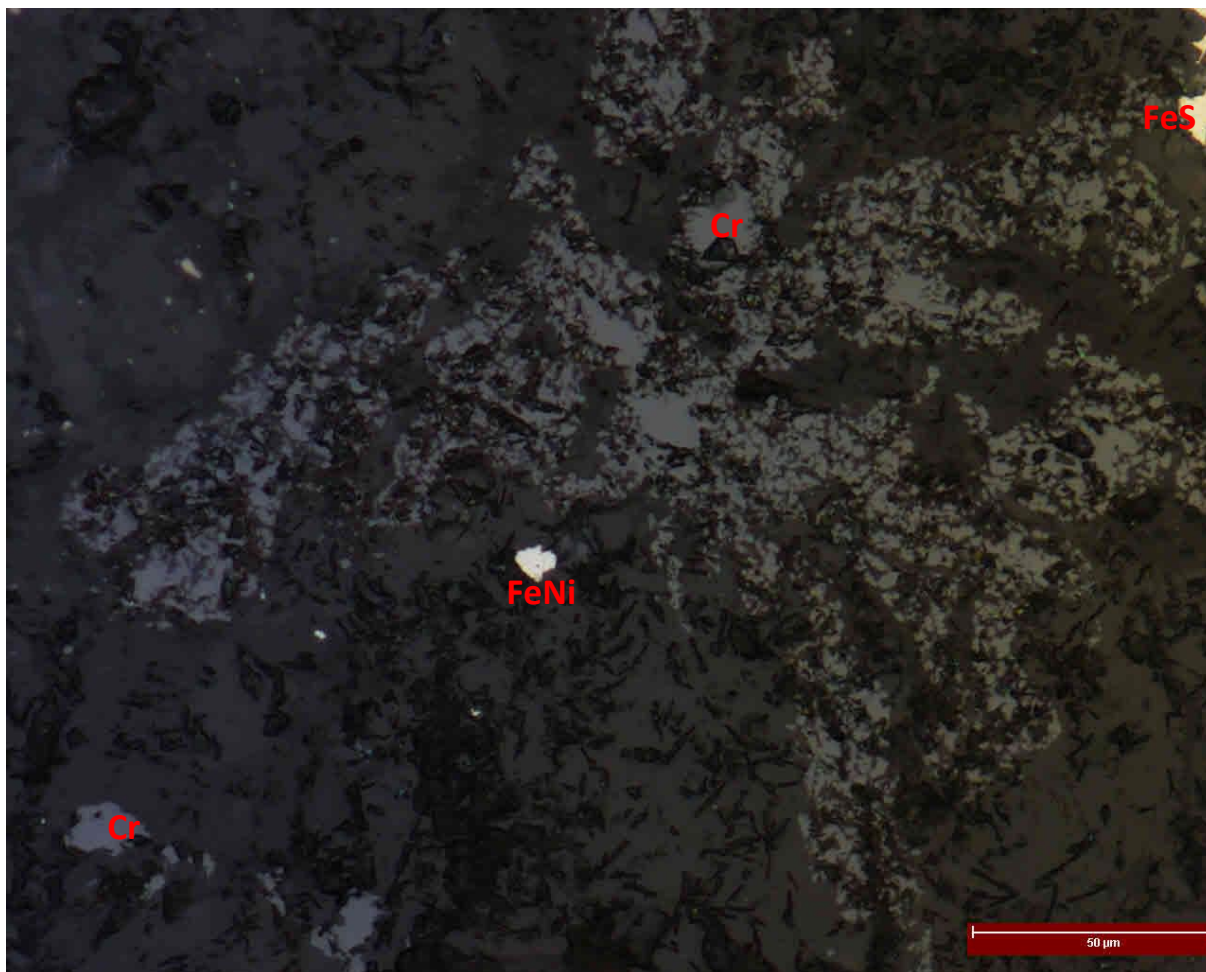
Rysunek 8.16. Ziarno stopu FeNi ulegające wietrzeniu



Rysunek 8.17. Porowate ziarno troilitu



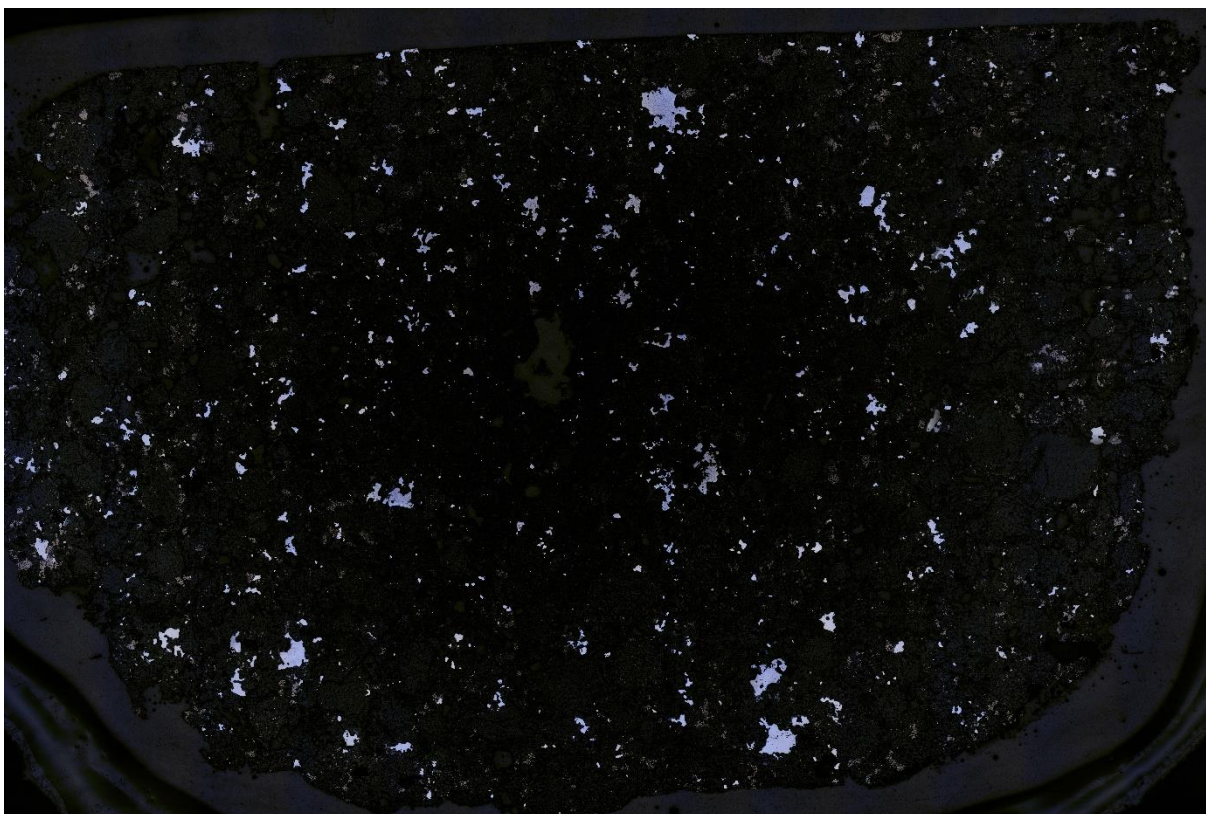
Rysunek 8.18. Ziarna stopu FeNi (jaśniejsze, białe) oraz troilitu (żółte) wokół chondry przedstawionej na rysunku 8.13



Rysunek 8.19. Ziarno chromitu oznaczone jako Cr

8.1.2. NWA 6410

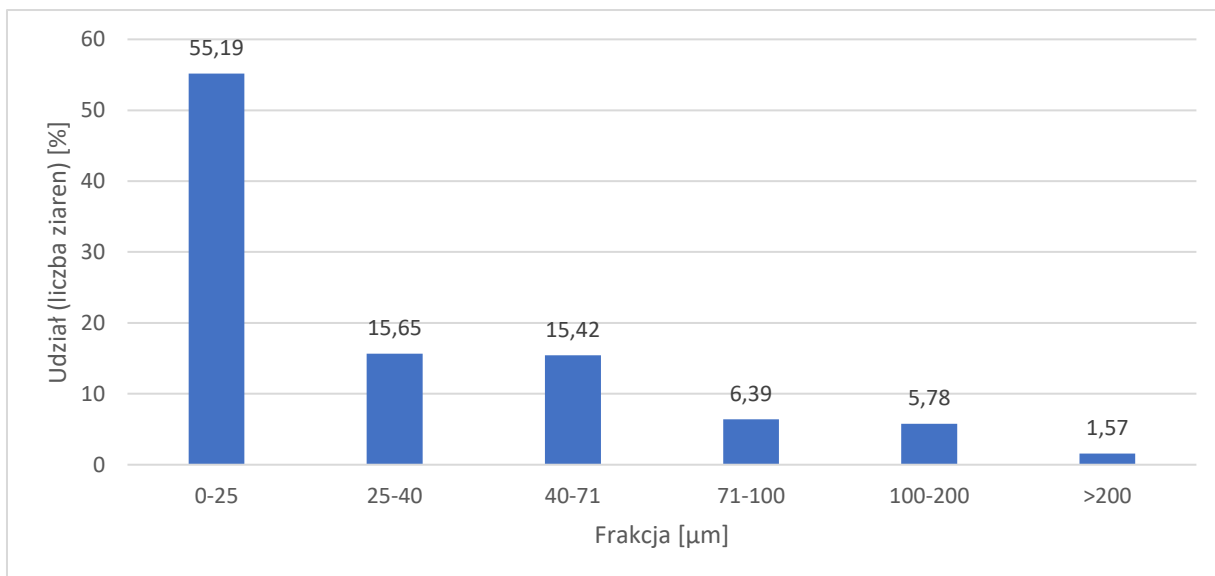
Podobnie jak w przypadku chondrytu Tamdakht, także dla chondrytu NWA 6410 uzyskano dane ilościowe dotyczące objętościowej zawartości ziaren stopu FeNi oraz troilitu. Wykonano również zdjęcia wybranych faz mineralnych obecnych w chondrycie NWA 6410, a także zdjęcie mikroskopowe całej płytki cienkiej poddanej analizie (Rysunek 8.20). Wyraźnie widać, że w porównaniu z płytką meteorytu Tamdakht, chondryt NWA 6410 jest mniej zasobny w stop FeNi.



Rysunek 8.20. Obraz mikroskopowy płytki cienkiej uzyskanej z chondrytu NWA 6410

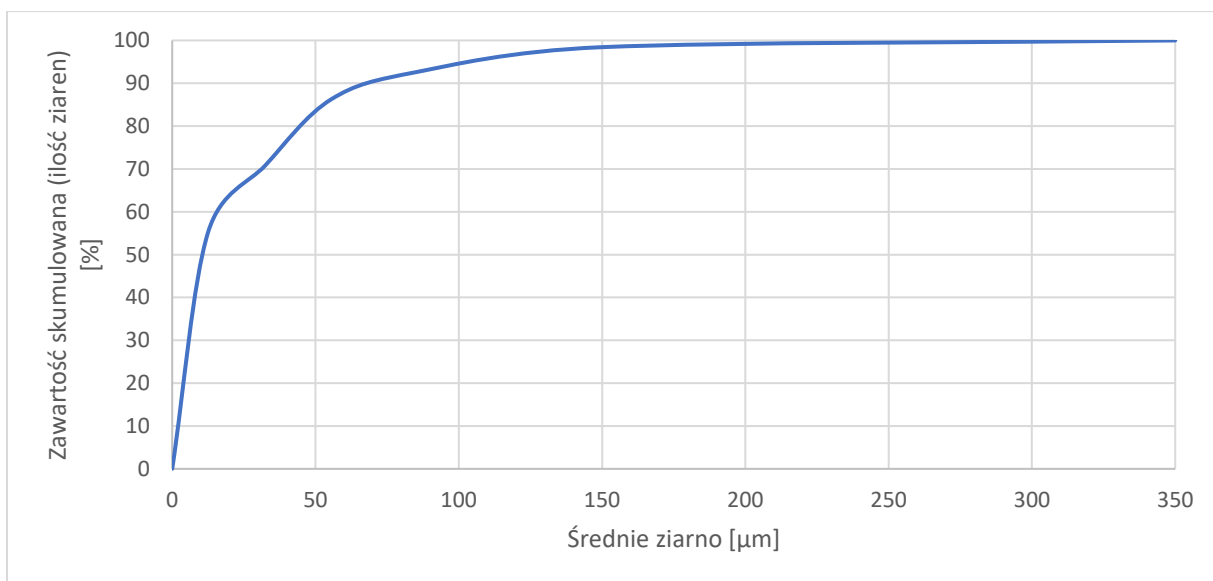
Stop FeNi

Obliczona zawartość objętościowa ziaren stopu FeNi to 2,32%. Na podstawie pomiarów ziaren stopu FeNi utworzono wykresy (Rysunek 8.21 oraz 8.22). Wykresy te odnoszą się do ilości ziaren w danym przedziale wielkości (jako wielkość ziarna przyjęto jego średnicę ekwiwalentną). Na rysunku 8.21 przedstawiono udział ilościowy ziaren w przedziałach typowych dla wielkości oczek w sitach służących do analizy sitowej. Zauważalne jest, że ilość ziaren mniejszych jest większa niż ziaren większych. Dane podane dla frakcji 0-25 μm są bardzo mocno niedoszacowane z uwagi na niemożliwość zliczania tych najmniejszych ziaren. Przy powiększeniu 25x w tym meteorycie możliwa była identyfikacja i pomiar ziaren o średnicy powyżej 8 μm . Gdyby badania były prowadzone przy większym powiększeniu możliwy byłby pomiar ziaren o mniejszej powierzchni, a tym samym udział frakcji 0-25 μm wzrósłby znacznie. Taki zabieg jednak miałby niewielki wpływ na wyniki przeprowadzonych badań, ponieważ ziarna o średnicy poniżej 8 μm stanowią pomijalny udział w całkowitej masie stopu FeNi. Największe pomierzone ziarno stopu FeNi miało powierzchnię 0,3 mm^2 oraz średnicę ekwiwalentną równą 625 μm .



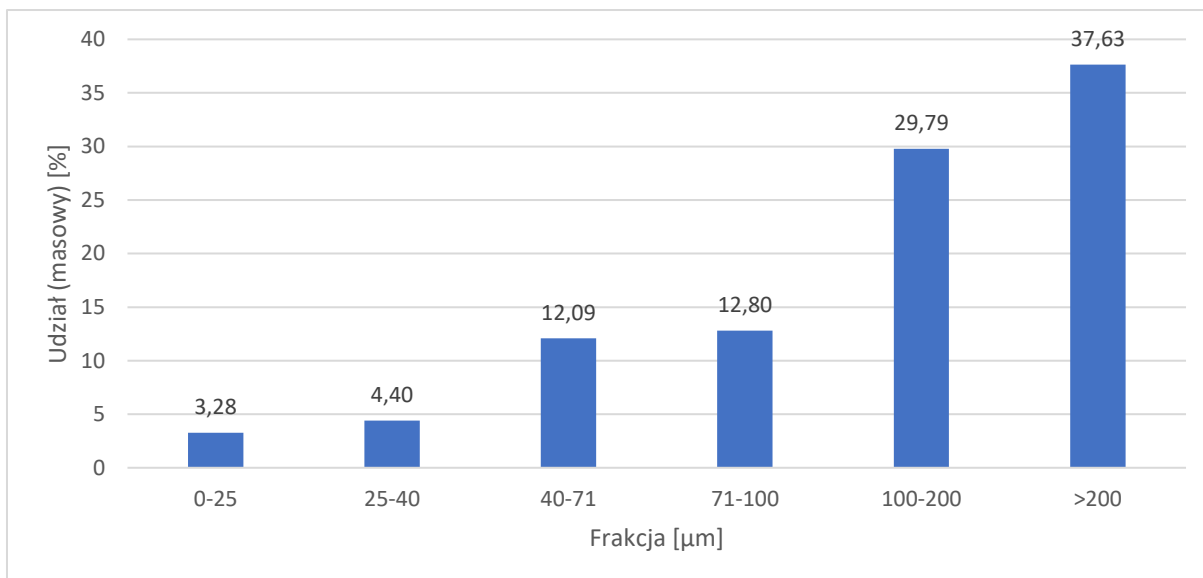
Rysunek 8.21. Udział ziaren FeNi (ich liczby) poszczególnych frakcji w meteorycie NWA 6410.

Rysunek 8.22 przedstawia krzywą skumulowaną składu ziarnowego minerałów FeNi. Na podstawie wykresu można stwierdzić, że ziarna poniżej 100 μm , dla których możliwa jest większość procesów przeróbczych, stanowią ponad 92% liczby wszystkich pomierzonych ziaren.



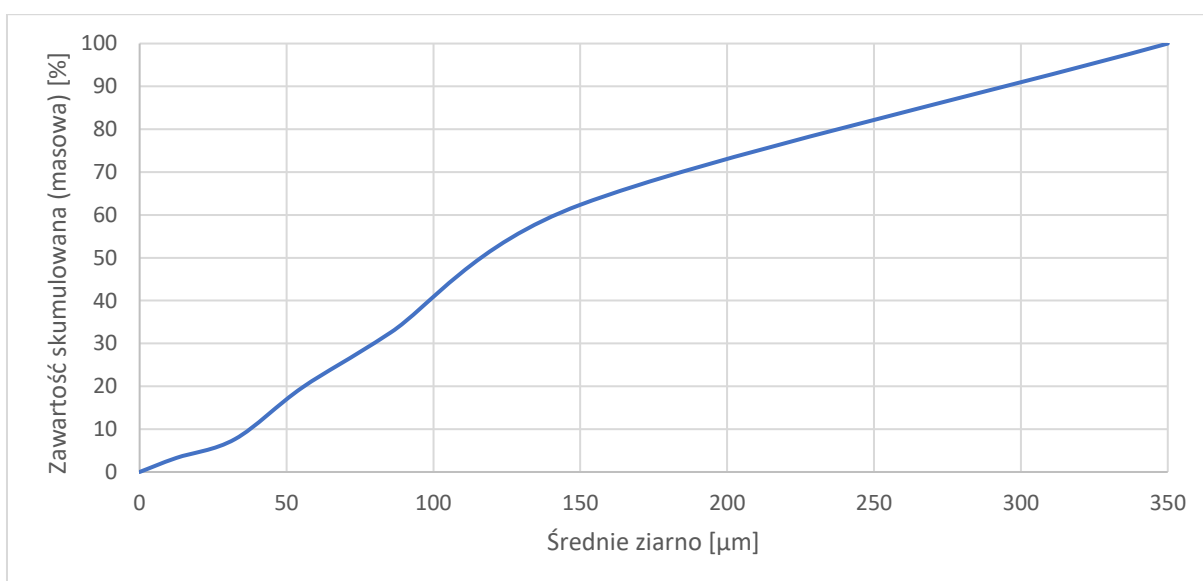
Rysunek 8.22. Krzywa skumulowana składu ziarnowego FeNi w meteorycie NWA 6410

Na rysunkach 8.23 oraz 8.24 przedstawiono wyniki podobnej analizy, ale w odniesieniu do masy, a nie do ilości ziaren. Założono, że ziarna stopu FeNi mają zbliżoną gęstość, w związku z czym możliwe jest przyjęcie wielkości ich powierzchni jako ekwiwalentu ich masy. Rysunek 8.23 przedstawia udział masowy ziaren w przedziałach typowych dla wielkości oczek w sitach służących do analizy sitowej. Na podstawie tego wykresu można stwierdzić, że ziarna o wielkości powyżej 100 μm , mimo iż stanowią 7,35% liczby wszystkich pomierzonych ziaren, stanowią aż 67,42% masy wszystkich ziaren stopu FeNi. Jest to mniej niż w meteorycie Tamdakht, jednak wartość ta nadal jest duża.



Rysunek 8.23. Udział poszczególnych frakcji ziaren FeNi (ich masy) w meteorycie NWA 6410

Rysunek 8.24 przedstawia krzywą skumulowaną składu ziarnowego.

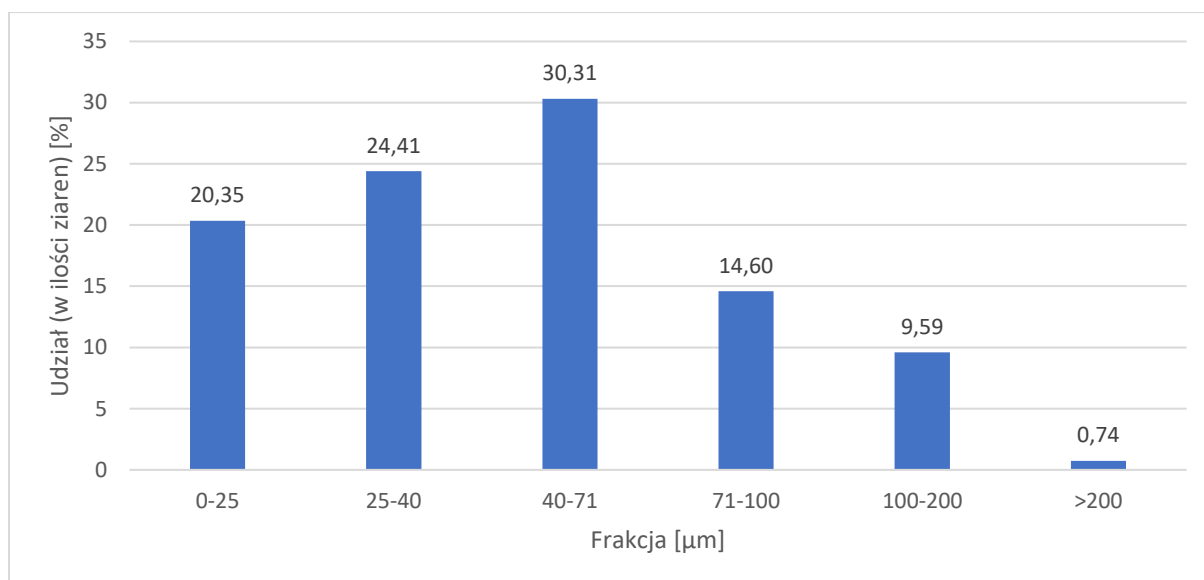


Rysunek 8.24. Krzywa skumulowana składu ziarnowe FeNi (masa) dla meteorytu NWA 6410

Troilit (FeS)

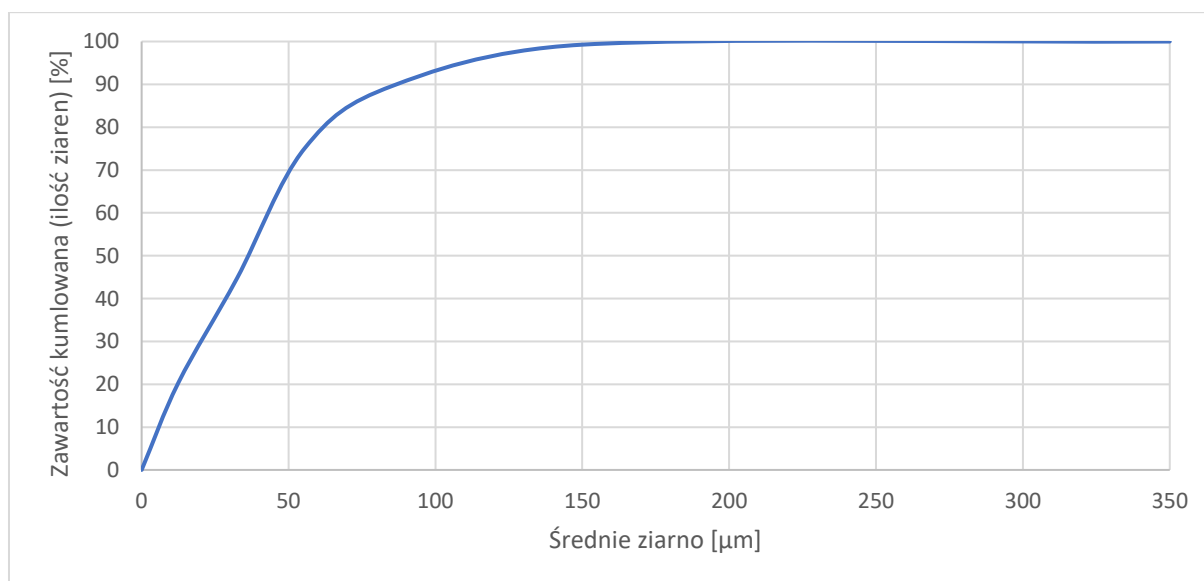
Dane dla troilitu zostały uzyskane i przedstawione w identyczny sposób jak dla stopu FeNi. Obliczona zawartość objętościowa ziaren troilitu wynosi 2,12%. Na podstawie pomiarów ziaren troilitu utworzono wykresy przedstawione na rysunkach 8.25 oraz 8.26. Wykresy te odnoszą się do ilości ziaren w danym przedziale wielkości (jako wielkość ziarna przyjęto jego średnicę ekwiwalentną). Na rysunku 8.25 przedstawiono udział ilościowy ziaren w przedziałach typowych dla wielkości oczek w sitach służących do analizy sitowej. Mniejszy udział ziaren o średnicy ekwiwalentnej w przedziale 0-25 μm , podobnie jak w przypadku ziaren FeNi i meteorytu Tamdakht, wynika z braku możliwości zliczenia wszystkich ziaren przy przyjętym 25-krotnym powiększeniu obrazu pod mikroskopem. Jest to nawet trudniejsze niż w

przypadku ziaren FeNi z uwagi na bardziej wygaszoną barwę tych minerałów w świetle odbitym (mniejszą zdolność refleksyjną). Przy powiększeniu 25x możliwa była identyfikacja i pomiar ziaren o średnicy powyżej 15 μm . W tym przypadku również nie ma wątpliwości co do tego, że ziaren o najmniejszych średnicach w całej objętości skały rudnej jest najwięcej, jednak ich znaczenie złożowe jest małe. Największe pomierzone ziarno troilitu miało powierzchnię 0,06 mm^2 oraz średnicę ekwiwalentną równą 274 μm .



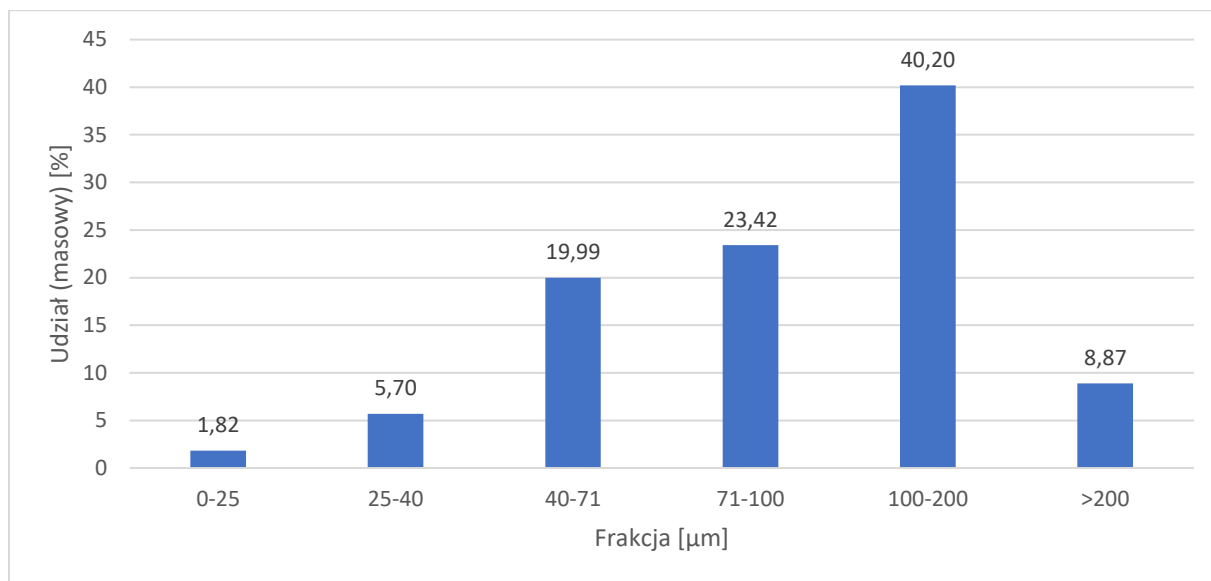
Rysunek 8.25. Udział poszczególnych frakcji ziaren troilitu (ich liczby) w meteorycie NWA 6410

Rysunek 8.26 przedstawia krzywą skumulowaną składu ziarnowego troilitu. Na podstawie przedstawionego wykresu można stwierdzić, że ziarna o średnicy ekwiwalentnej poniżej 100 μm , dla których możliwa jest większość procesów przeróbczych, stanowią nieco ponad 90% liczby wszystkich pomierzonych ziaren.



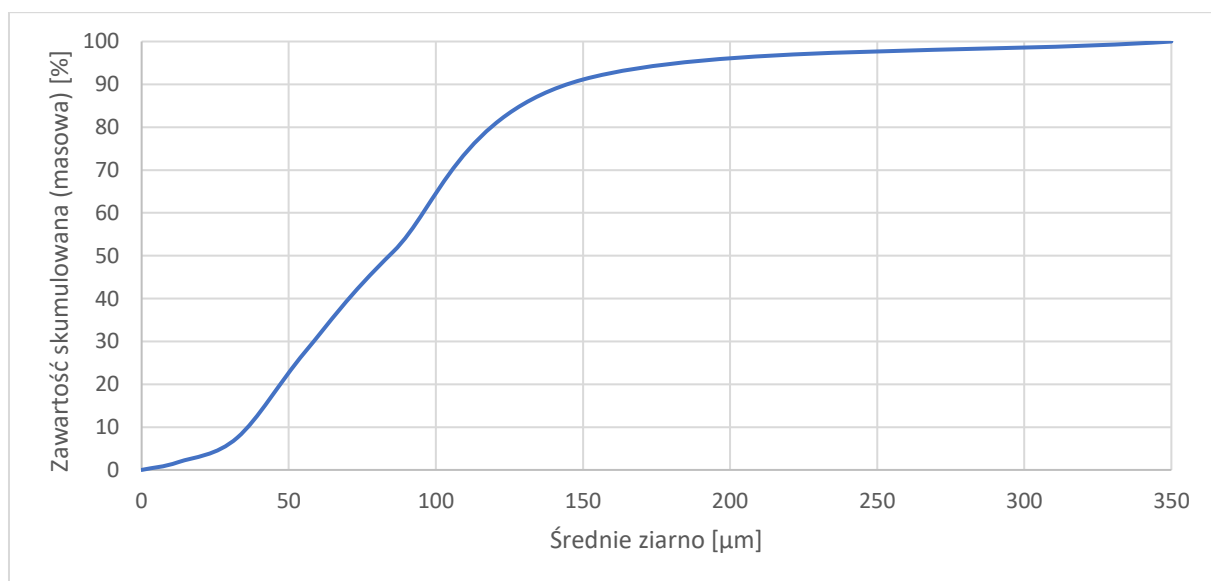
Rysunek 8.26. Krzywa skumulowana składu ziarnowego troilitu w meteorycie NWA 6410

Na rysunkach 8.27 oraz 8.28 przedstawiono wyniki podobnej analizy, ale w odniesieniu do masy, a nie do ilości ziaren. Założono, że ziarna stopu FeNi mają zbliżoną gęstość, w związku z czym możliwe jest przyjęcie wielkości ich powierzchni jako ekwiwalentu ich masy. Wykres przedstawiony na rysunku 8.27 pokazuje udział masowy ziaren w przedziałach typowych dla wielkości oczek w sitach służących do analizy sitowej. Na podstawie tego wykresu można stwierdzić, że ziarna o wielkości powyżej 100 μm , mimo iż stanowią tylko około 10,33% liczby wszystkich pomierzanych ziaren, to stanowią aż 49,07% masy wszystkich ziaren siarczku żelaza. Oznacza to, że większość masy troilitu stanowią ziarna o średnicy ekwiwalentnej poniżej 100 μm .



Rysunek 8.27. Udział poszczególnych frakcji ziaren troilitu (ich masy) w meteorycie NWA 6410

Rysunek 8.28 przedstawia krzywą skumulowaną składu ziarnowego.

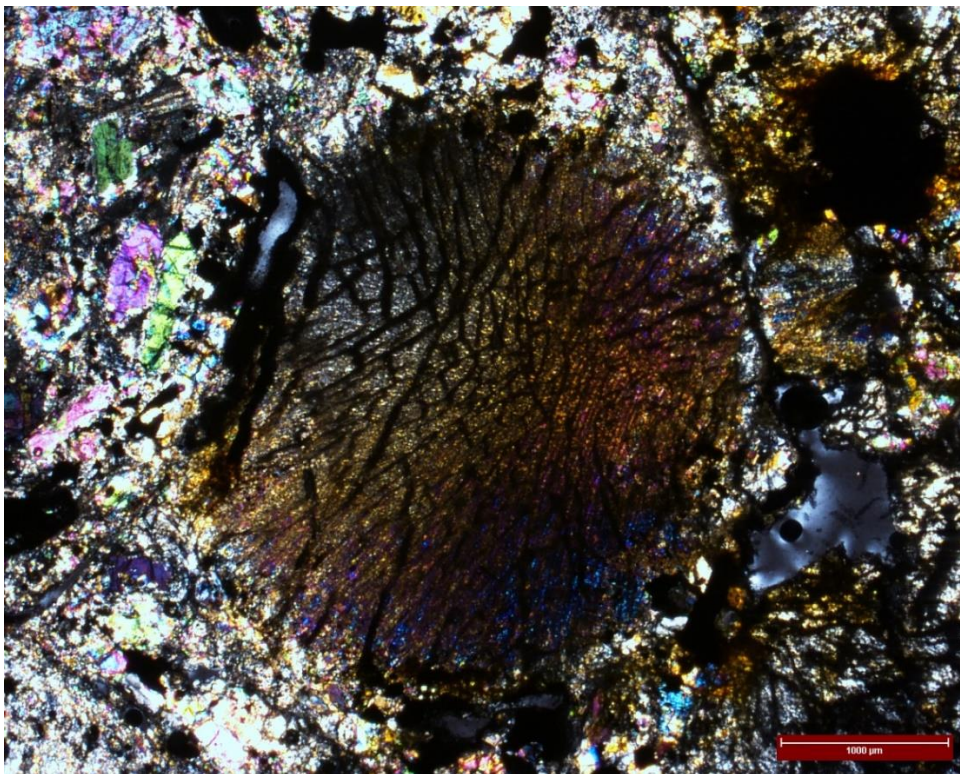


Rysunek 8.28. Krzywa skumulowana składu ziarnowego troilitu (masa) w meteorycie NWA 6410

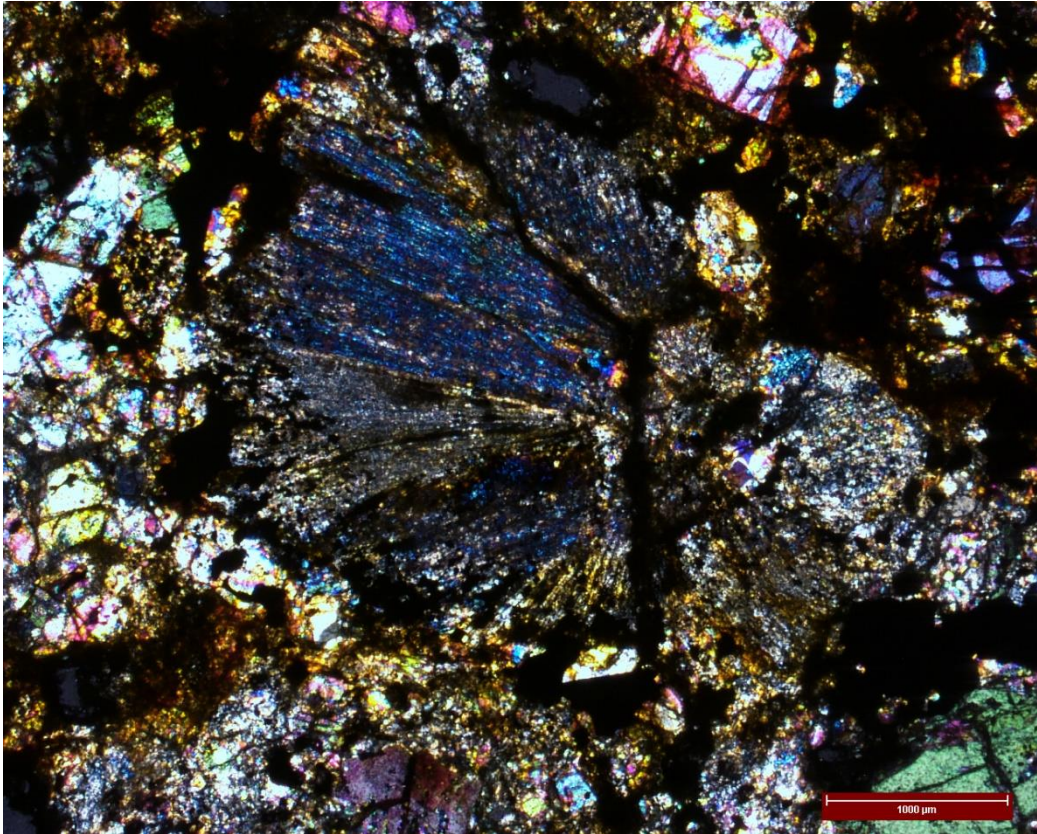
Biorąc pod uwagę, że siarczek żelaza jest w tym przypadku składnikiem niepożądanym, przyjmując ziarno podziałowe na sicie 100 μm , wydaje się teoretycznie możliwe pozbycie się przy kruszeniu i odsianiu ponad 50% troilitu (FeS). Przy ziarnie podziałowym 150 μm odsianiu ulec mogłoby nawet 72,87% wag. troilitu przy zachowaniu 50,46% wag. stopu FeNi.

Obserwacje mikroskopowe meteorytu NWA 6410

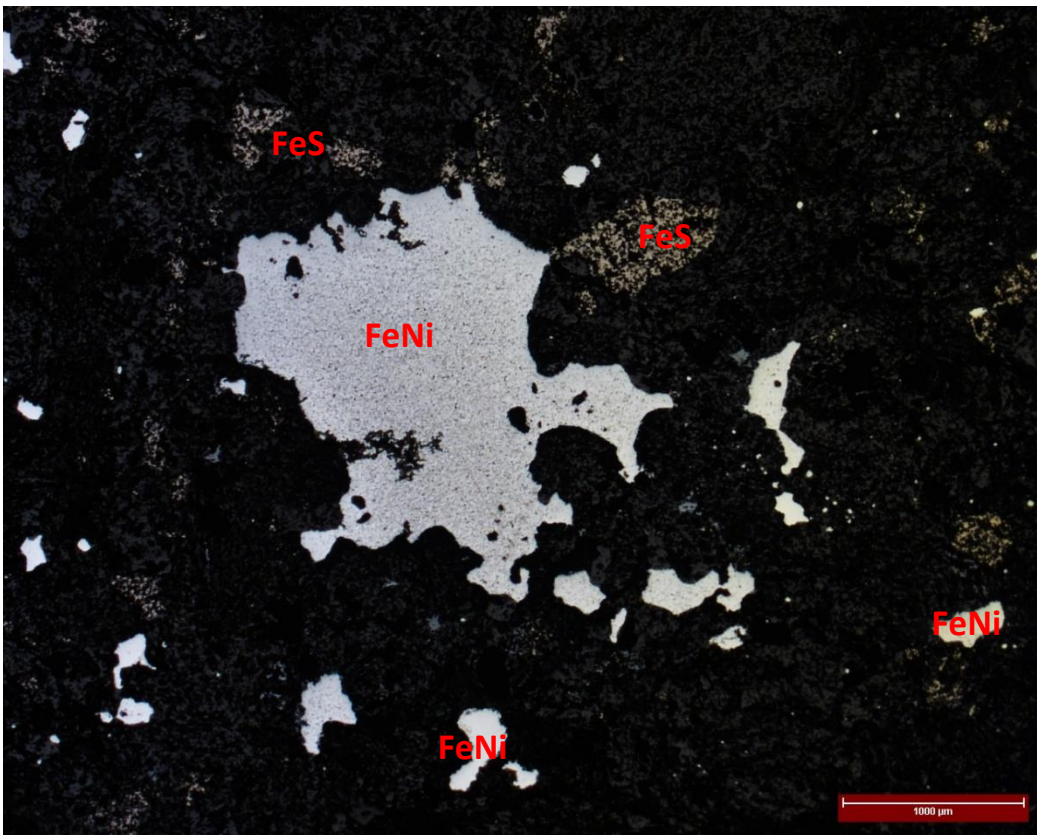
W chondrycie NWA 6410 obserwowano liczne chondry (Rysunki 8.29 oraz 8.30). Obserwowane były także minerały nieprzezroczyste (rysunki 8.31 do 8.34). Wyraźnie zauważalne jest, że minerały nieprzezroczyste przeważnie są mocno porowate. Występują również stosunkowo duże ziarna chromitu.



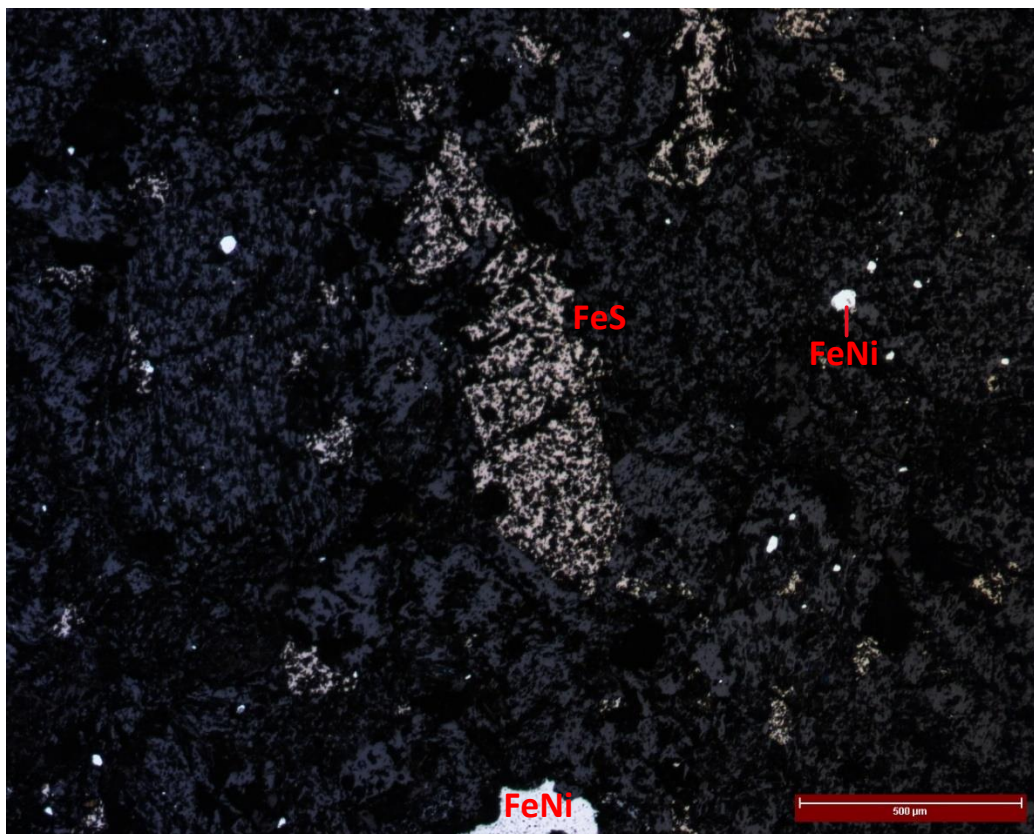
Rysunek 8.29. Chondra piroksenowa promienista



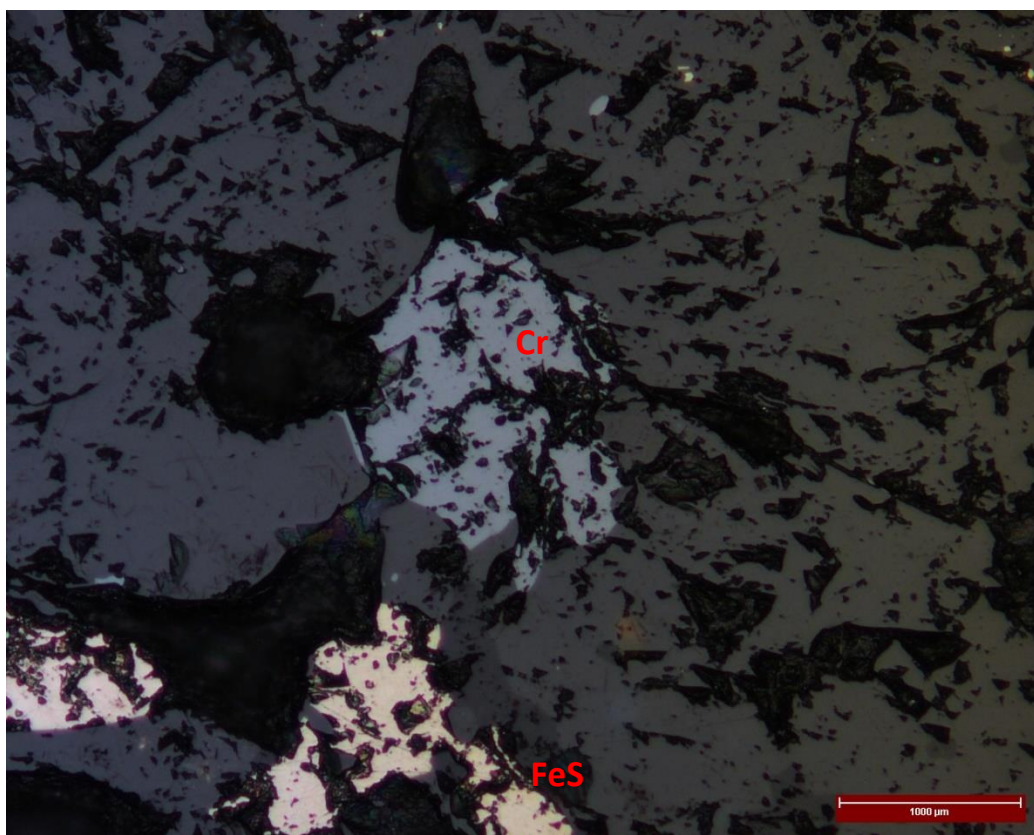
Rysunek 8.30. Chondra piroksenowa promienista



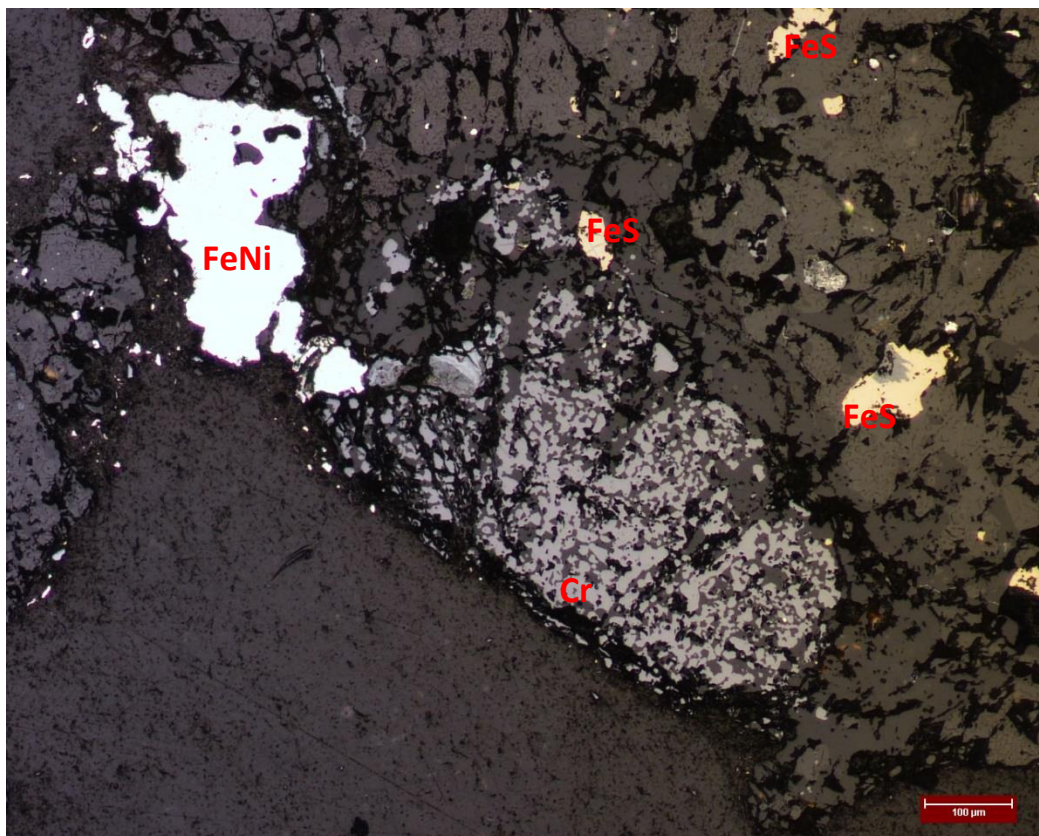
Rysunek 8.31. Stop FeNi oraz troilit



Rysunek 8.32. Porowate ziarno troilitu (FeS).



Rysunek 8.33. Ziarno chromitu (Cr), poniżej ziarna troilitu (FeS).



Rysunek 8.34. Ziarno stopu FeNi (białe), chromitu (szare) oraz troilitu (żółte)

8.2. Analiza składu mineralnego i chemicznego (badania w mikroobszarze)

8.2.1. Tamdakht

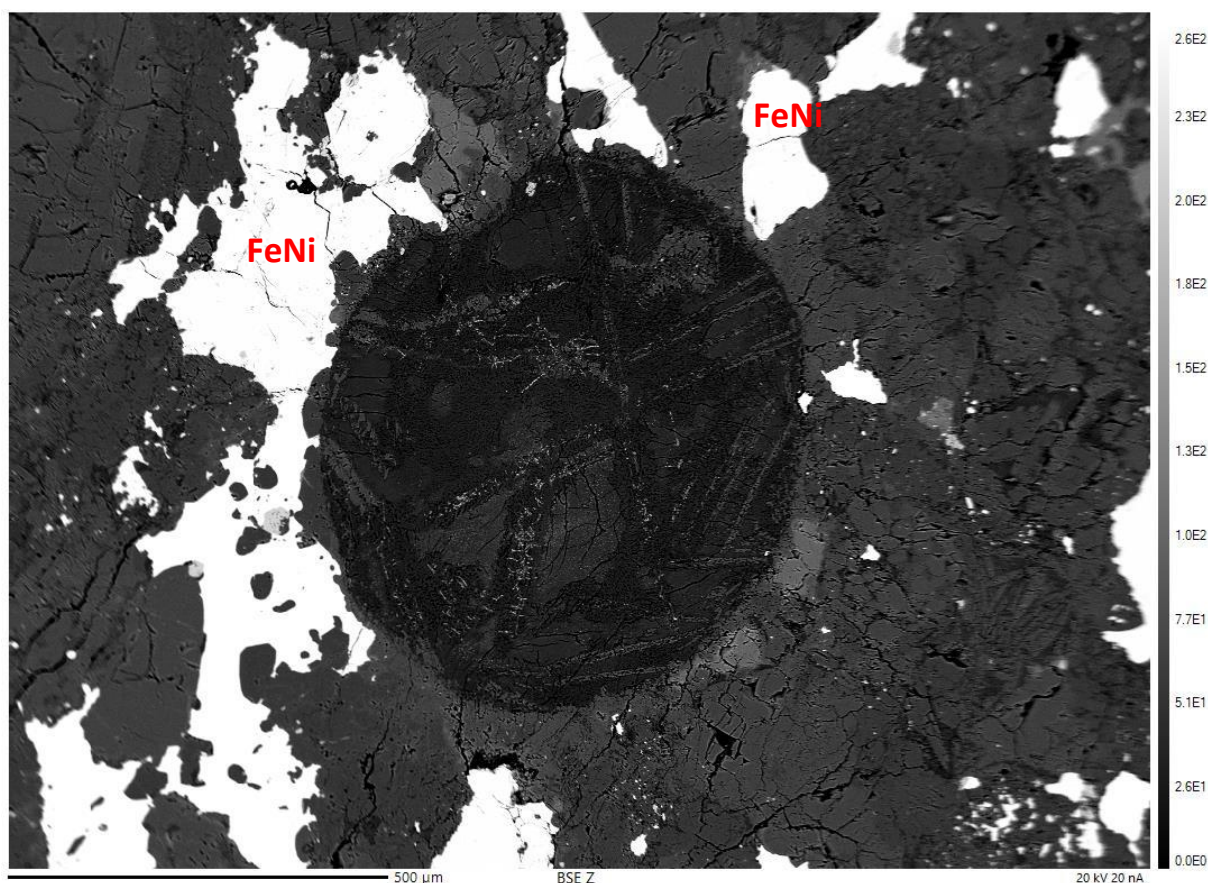
Krzemiany i glinokrzemiany

W meteorycie Tamdakht wykonano analizy składu chemicznego oliwinów, piroksenów, skaleni oraz kwarcu. W tabeli 8.1 przedstawiono skład tlenkowy analizowanych minerałów. Choć w tej pracy nie jest rozważane wykorzystanie tego typu minerałów do pozyskiwania surowców, należy zwrócić uwagę, że takie prace prowadzone są w innych ośrodkach naukowych. Zasadnym jest więc podkreślenie, że minerały te mogą być w przyszłości również źródłem wybranych metali (Balasubramaniam i in., 2010; Schwandt i in., 2012; Rasera i in., 2020; Meurisse i in., 2022). Dopełnia to charakterystykę skały płonnej.

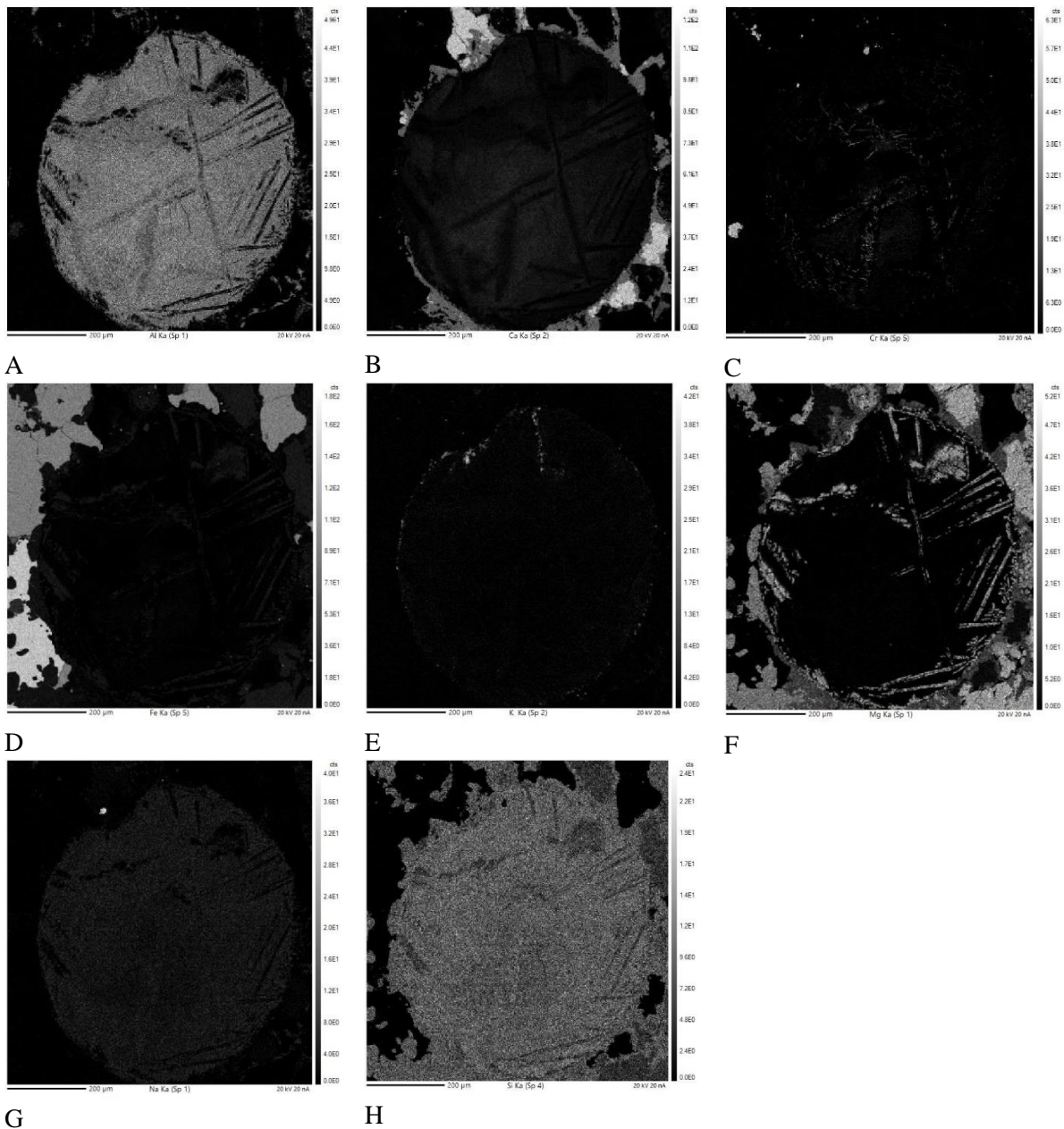
Tabela 8.1. Skład tlenkowy krzemianów i glinokrzemianów w meteorycie Tamdakht

| tlenek | oliwin | | | piroksen | | | skaleń | kwarc | | |
|--------------------------------|--------|-------|---------|----------|-------|---------|--------|-------|--------|---------|
| | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia | - | Min | Max | średnia |
| | % | | | | | | | | | |
| | n = 15 | | | n = 5 | | | n = 1 | n = 4 | | |
| MgO | 43,50 | 44,98 | 44,23 | 32,02 | 32,35 | 32,25 | 0,09 | 0,01 | 0,15 | 0,07 |
| MnO | 0,42 | 0,48 | 0,45 | 0,44 | 0,49 | 0,46 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| NiO | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | - | - | - | - |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,16 | 0,03 | 0,06 | 0,18 | 0,12 | - | - | - | - |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,24 | 0,04 | 0,05 | 0,22 | 0,13 | - | - | - | - |
| SiO ₂ | 38,93 | 39,78 | 39,29 | 56,48 | 57,07 | 56,82 | 54,60 | 99,84 | 100,00 | 99,96 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 3,47 | 0,00 | 0,06 | 0,04 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,06 | 0,19 | 0,12 | 28,76 | 0,03 | 0,17 | 0,13 |
| CaO | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,20 | 0,62 | 0,45 | 11,38 | 0,03 | 0,30 | 0,12 |
| FeO | 16,85 | 17,37 | 17,04 | 10,75 | 11,34 | 11,09 | 0,45 | 0,16 | 0,20 | 0,18 |
| K ₂ O | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,09 | 0,02 | 0,04 | 0,03 |

W czasie badań zauważono dużą chondrę szklaną (Rysunek 8.35). W obszarze, w którym się znajduje wykonano mapy pierwiastkowe dla: glinu (A), wapnia (B), chromu (C), żelaza (D), potasu (E), magnezu (F), sodu (G) oraz krzemu (G) (Rysunek 8.36).



Rysunek 8.35. Chondra szklana bogata w glin. Obraz BSE



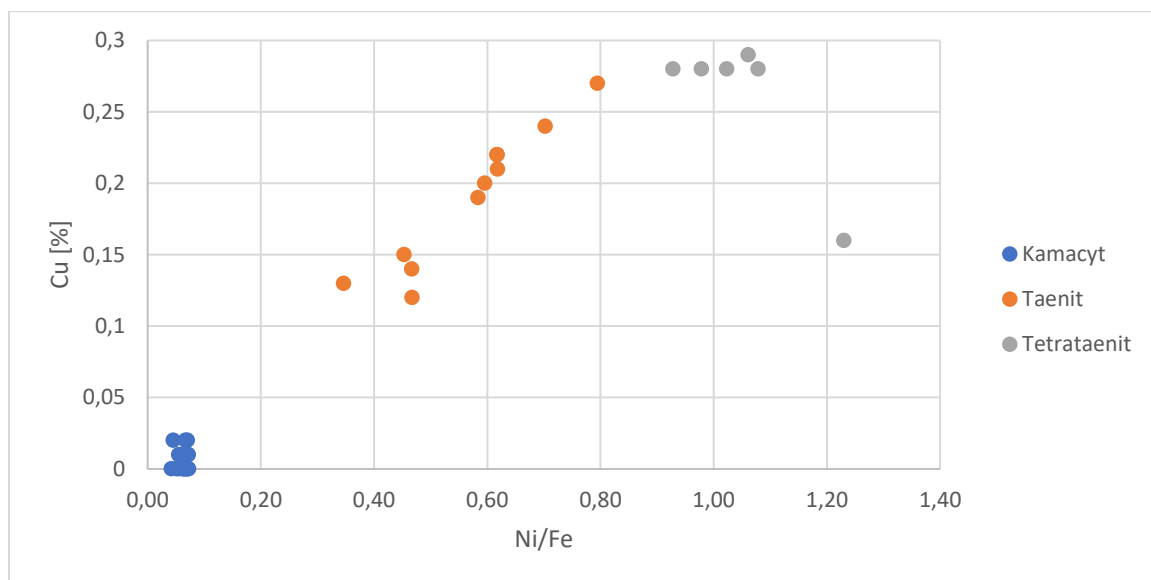
Rysunek 8.36. Mapa rozkładu pierwiastków chondry bogatej w glin. A - glin, B - wapń, C - chrom, D - żelazo, E - potas, F - magnez, G - sód, H – krzem

Stop FeNi

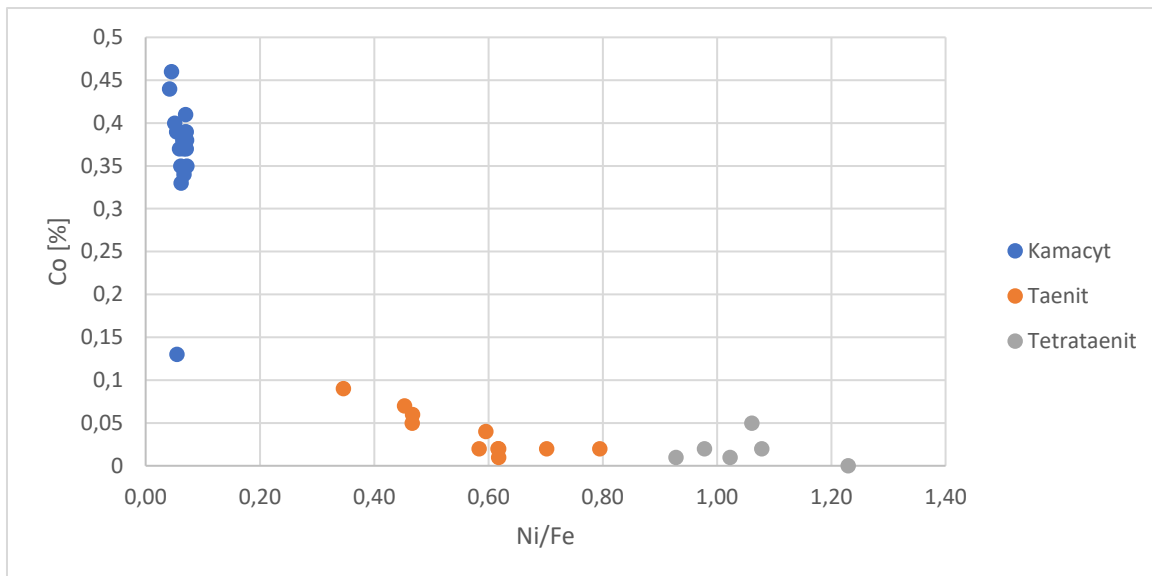
W meteorycie Tamdakht zaobserwowano występowanie kamacytu, taenitu oraz tetrataenitu. W tabeli 8.2 przedstawiono skład chemiczny poszczególnych faz mineralnych ziaren stopu FeNi. Zgodnie z oczekiwaniem (Blutstein i Pawliszyn, 2021) kamacyt jest wzbogacony w kobalt (średnio 0,37%), natomiast taenit oraz tetrataenit w miedź (średnia odpowiednio 0,19% oraz 0,26%). Na rysunku 8.37 oraz 8.38 przedstawiono wykresy zależności występowania kobaltu oraz miedzi od stosunku zawartości Ni/Fe. Warto zauważyć, że zawartość Cu w taenicie rośnie wraz ze wzrostem zawartości Ni, natomiast w tetrataenicie zawartość Cu jest niemal stała. Odwrotnie sytuacja wygląda dla kobaltu, gdzie większa koncentracja występuje w kamacycie, zaś w taenicie i tetrataenicie jest wyraźnie niższa.

Tabela 8.2. Skład chemiczny stopu FeNi w meteorycie Tamdakht

| pierwiastek | kamacyt | | | taenit | | | tetrataenit | | |
|-------------|---------|-------|---------|--------|-------|---------|-------------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia |
| | % | | | | | | | | |
| | n = 19 | | | n = 11 | | | n = 6 | | |
| Mg | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Al | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Si | 0,00 | 0,15 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,01 |
| P | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| S | 0,00 | 0,26 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,01 |
| Ti | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Cr | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,00 | 0,12 | 0,03 | 0,00 | 0,16 | 0,03 |
| Mn | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Fe | 91,99 | 94,61 | 93,27 | 55,21 | 74,11 | 63,52 | 44,56 | 50,80 | 48,38 |
| Co | 0,13 | 0,46 | 0,37 | 0,01 | 0,09 | 0,04 | 0,00 | 0,05 | 0,02 |
| Ni | 3,91 | 6,64 | 5,82 | 25,63 | 43,86 | 35,52 | 47,13 | 54,79 | 50,58 |
| Cu | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,12 | 0,27 | 0,19 | 0,16 | 0,29 | 0,26 |
| Zn | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 |

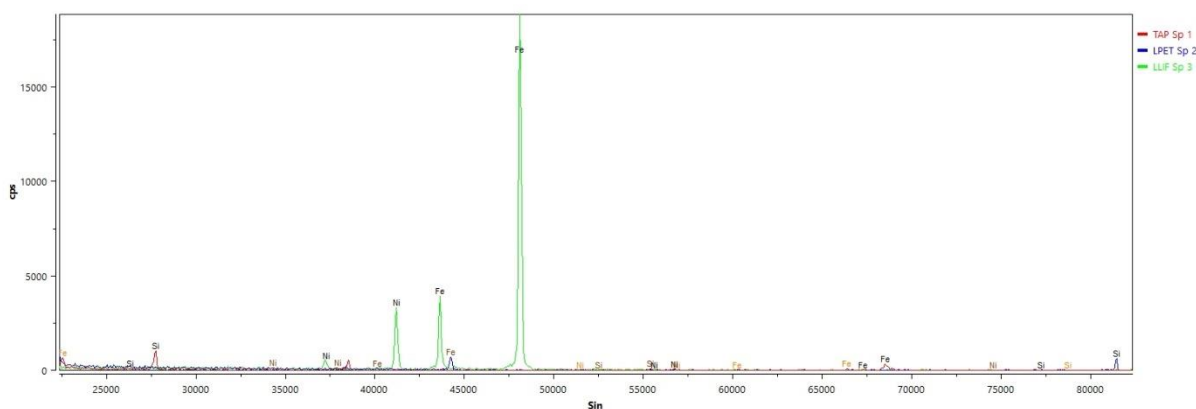


Rysunek 8.37. Zależność zawartości miedzi od stosunku Ni/Fe dla stopu FeNi w meteorycie Tamdakht

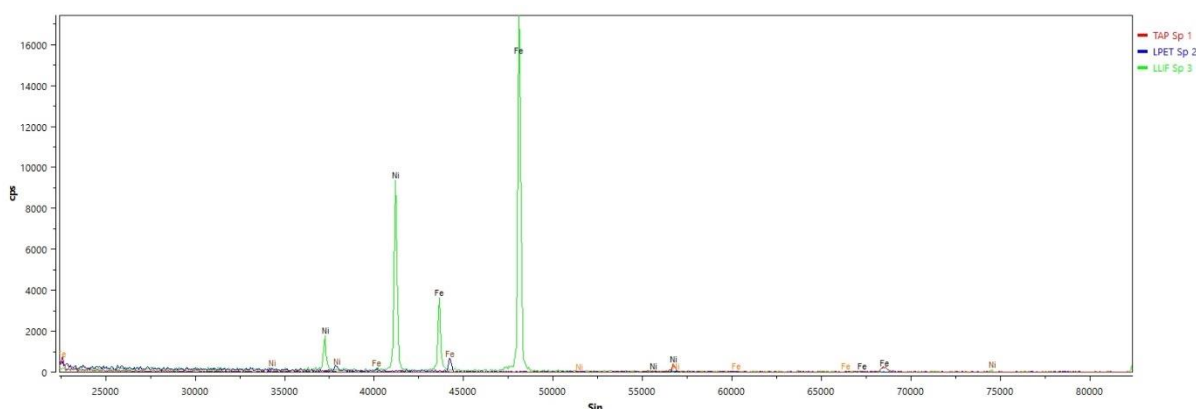


Rysunek 8.38. Zależność zawartości kobaltu od stosunku Ni/Fe dla stopu FeNi w meteorycie Tamdakht

Na rysunkach 8.39 oraz 8.40 przedstawiono wykresy WDS ziaren stopu FeNi.

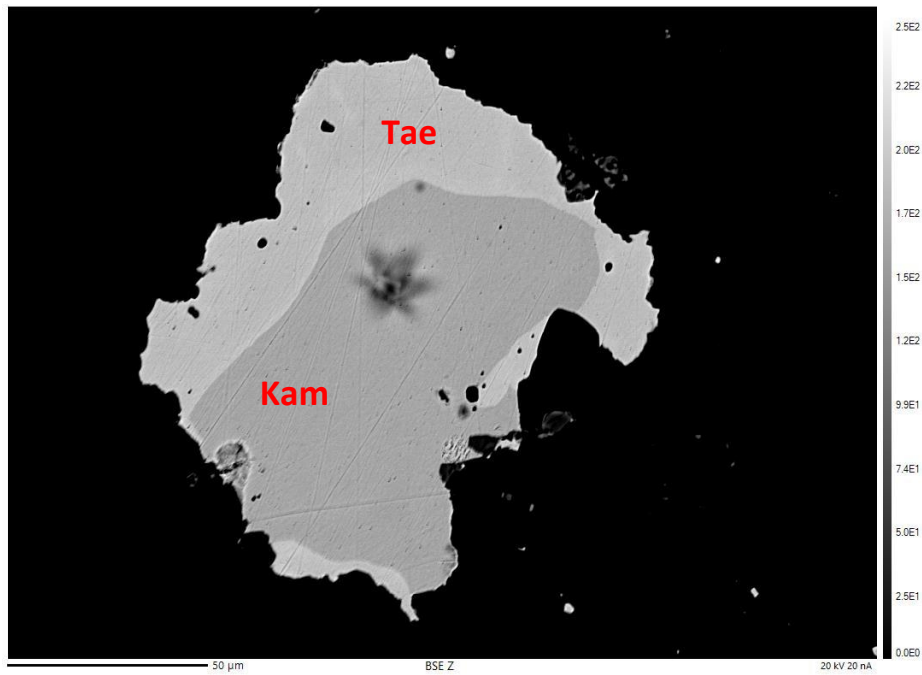


Rysunek 8.39. Wykres WDS ziarna kamacytu pochodzącego z meteorytu Tamdakht

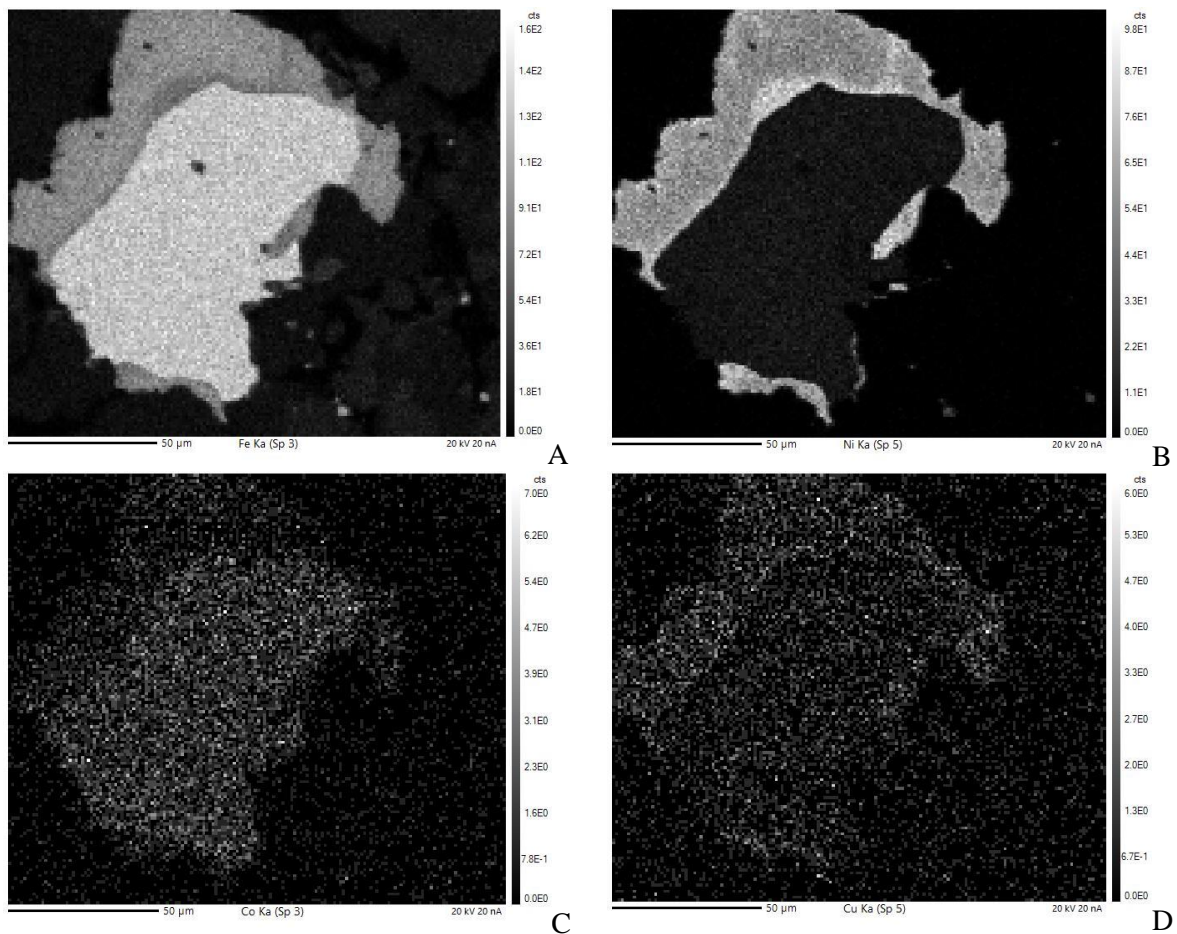


Rysunek 8.40. Wykres WDS ziarna taenitu pochodzącego z meteorytu Tamdakht

Na rysunkach 8.41 oraz 8.42 przedstawiono obrazy BSE kamacytu oraz taenitu. Przedstawiono także mapy pierwiastkowe dla żelaza, niklu, miedzi oraz kobaltu. Wyraźnie widoczna jest większa koncentracja miedzi w taenicie, natomiast kobaltu w kamacycie.



Rysunek 8.41. Ziarno stopu FeNi w meteorycie Tamdakht (obraz BSE). Faza jaśniejsza – taenit, faza ciemniejsza – kamacyt



Rysunek 8.42. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków w ziarnach stopu FeNi w meteorycie Tamdakht. A - żelazo, B – nikiel, C – kobalt, D – miedź (na rys. 8.41 przedstawiono obraz BSE)

Troilit (FeS)

W meteorycie Tamdakht zaobserwowano liczne ziarna troilitu. W tabeli 8.3 przedstawiono jego skład chemiczny. Skład siarczku żelaza jest niemal stały.

Tabela 8.3. Skład chemiczny troilitu w meteorycie Tamdakht

| pierwiastek | troilit | | |
|-------------|---------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia |
| | % | | |
| | n = 16 | | |
| Mg | 0,00 | 0,10 | 0,01 |
| Al | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Si | 0,00 | 0,13 | 0,01 |
| P | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| S | 34,85 | 36,29 | 35,92 |
| Ti | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Cr | 0,00 | 0,14 | 0,02 |
| Mn | 0,00 | 0,03 | 0,01 |
| Fe | 62,69 | 63,26 | 62,91 |
| Co | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ni | 0,02 | 0,93 | 0,11 |
| Cu | 0,00 | 0,04 | 0,02 |
| Zn | 0,00 | 0,03 | 0,00 |

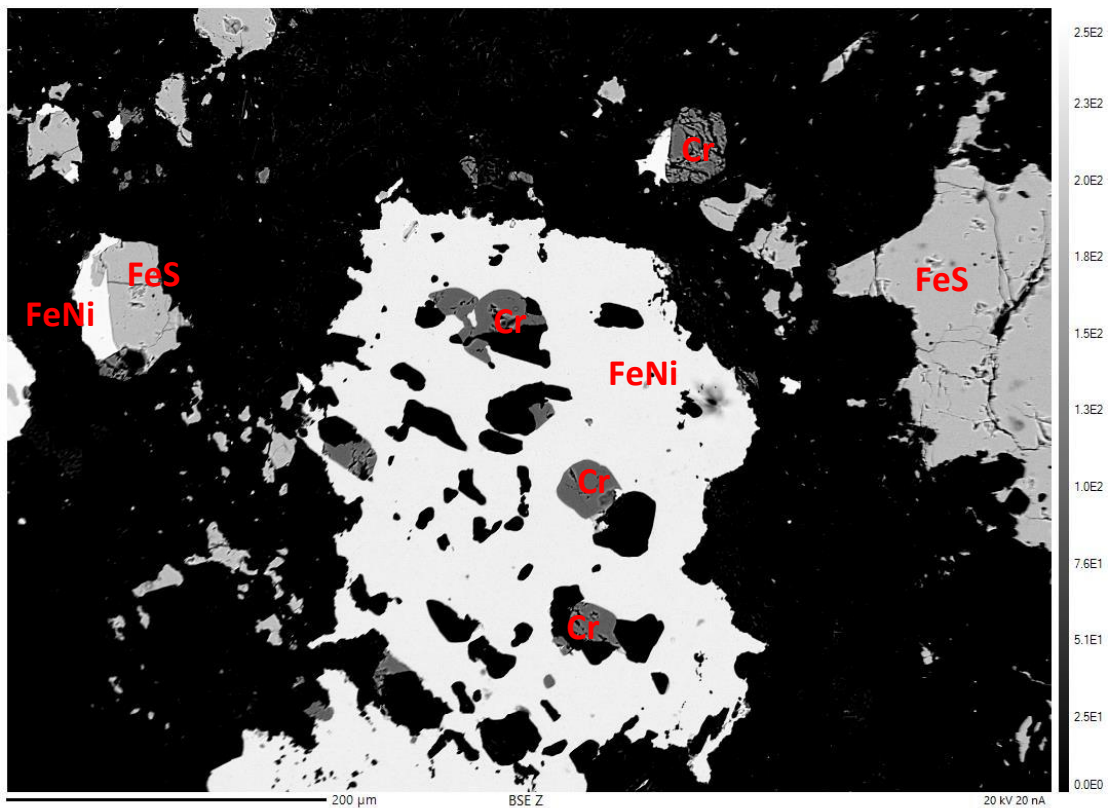
Chromit

Zaobserwowano także ziarna chromitu. W tabeli 8.4 przedstawiono skład tlenkowy badanych ziaren chromitów. Przy rozważaniu eksploatacji chromu, przy okazji pozyskiwane mogłyby być również tytan, mangan, żelazo, cynk oraz wanad, które wykazują znaczne wzbogacenie w tym mineralu w stosunku do pozostałych minerałów występujących w chondrytach zwyczajnych.

Tabela 8.4. Skład chemiczny chromitu w meteorycie Tamdakht

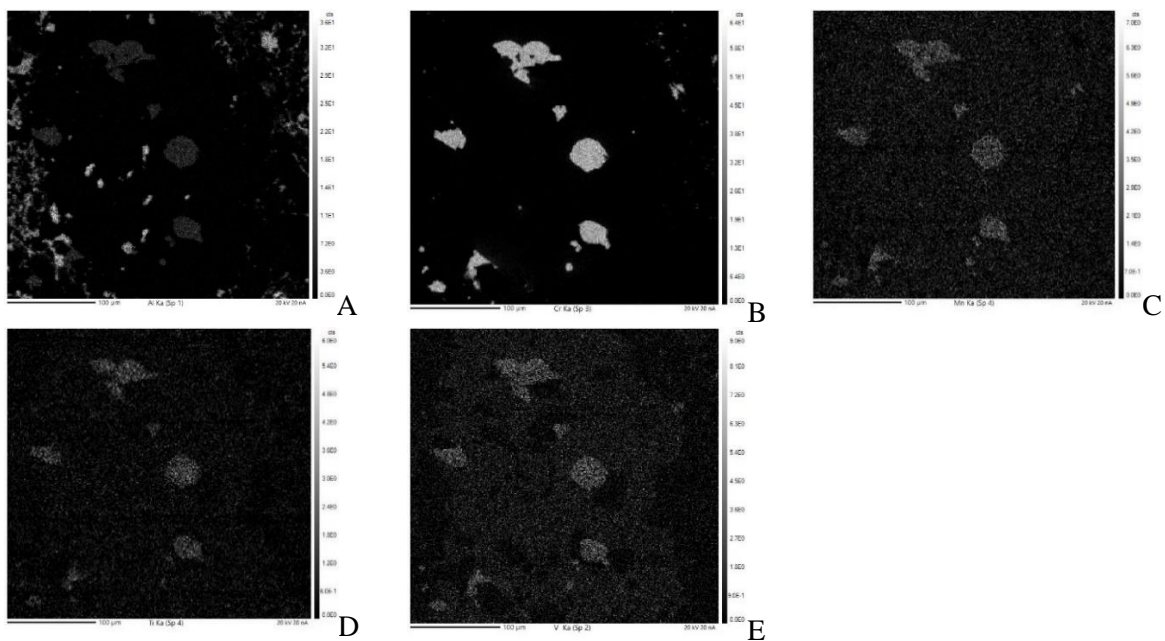
| tlenek | chromit | | |
|--------------------------------|---------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia |
| | % | | |
| | n = 13 | | |
| MgO | 2,45 | 3,34 | 2,80 |
| Al ₂ O ₃ | 6,49 | 7,31 | 6,80 |
| CaO | 0,00 | 0,05 | 0,02 |
| TiO ₂ | 1,06 | 1,72 | 1,50 |
| MnO | 1,03 | 1,13 | 1,09 |
| FeO | 28,55 | 29,46 | 29,18 |
| NiO | 0,00 | 0,17 | 0,03 |
| SiO ₂ | 0,00 | 0,33 | 0,07 |
| Cr ₂ O ₃ | 55,59 | 57,45 | 56,91 |
| CoO | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ZnO | 0,30 | 0,37 | 0,33 |
| V ₂ O ₃ | 0,73 | 0,82 | 0,77 |

Na rysunku 8.43 przedstawiono obraz BSE, na którym widoczne jest ziarno stopu FeNi (najjaśniejsza faza) wraz ze współwystępującymi ziarnami troilitu (faza jasnoszara) oraz chromitu (faza ciemnoszara).



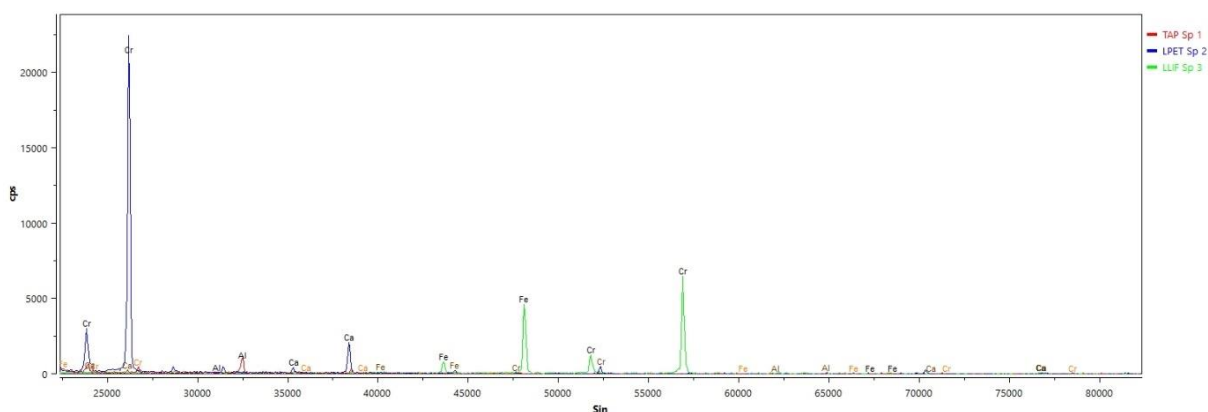
Rysunek 8.43. Ziarno stopu FeNi wraz ze współwystępującymi ziarnami troilitu oraz chromitu w chondrycie Tamdakht

Dla obszaru przedstawionego na rysunku 8.44 wykonano mapy rozkładu zawartości pierwiastków: glinu, chromu, manganu, tytanu oraz wanadu, charakterystycznych dla chromitu.



Rysunek 8.44. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków dla obszaru z rysunku 8.43. A – glin, B – chrom, C – mangan, D – tytan, E – wanad

Na rysunku 8.45 przedstawiono wykres WDS dla chromitu.



Rysunek 8.45. Wykres WDS dla chromitu

Fosforany

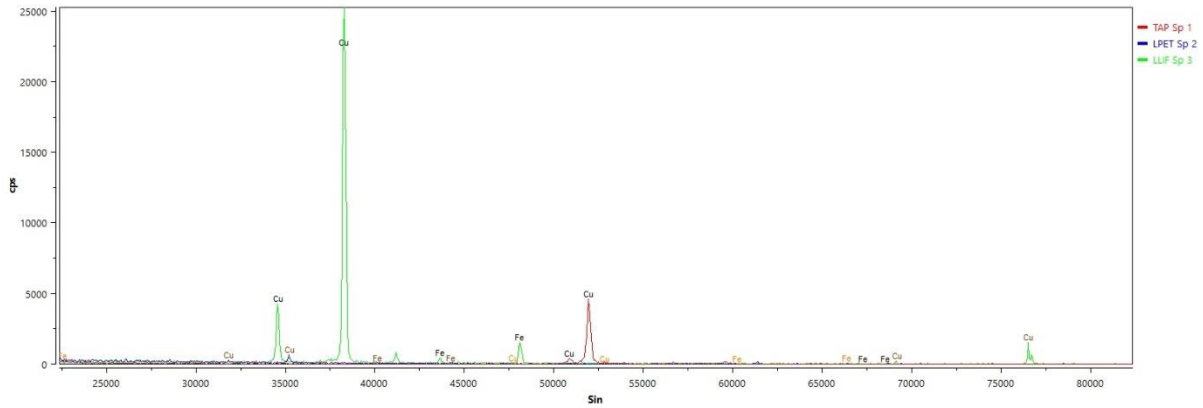
W chondrycie Tamdakht zaobserwowano liczne fosforany, głównie merillity. W tabeli 8.5 przedstawiono skład chemiczny fosforanów poddanych analizie. Fosforany są nieznacznie wzbogacone w pierwiastki ziem rzadkich, które również są potencjalnym surowcem dla eksploatacji górniczej.

Tabela 8.5. Skład chemiczny fosforanów w meteorycie Tamdakht

| składnik | apatyt | | | merillit | | |
|--------------------------------|--------|-------|---------|----------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia |
| | % | | | | | |
| | n = 2 | | | n = 16 | | |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cl | 3,16 | 3,25 | 3,21 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Na ₂ O | 0,24 | 0,28 | 0,26 | 1,74 | 2,82 | 2,28 |
| SiO ₂ | 0,25 | 0,85 | 0,55 | 0,01 | 0,22 | 0,05 |
| P ₂ O ₅ | 39,75 | 40,31 | 40,03 | 42,77 | 46,13 | 44,58 |
| SO ₂ | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,01 |
| CaO | 55,65 | 56,26 | 55,96 | 48,26 | 49,88 | 49,22 |
| MgO | 0,24 | 1,16 | 0,70 | 3,40 | 3,75 | 3,62 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Y ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,08 | 0,04 |
| La ₂ O ₃ | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,01 |
| Ce ₂ O ₃ | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,05 | 0,02 |
| Pr ₂ O ₃ | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 |
| Nd ₂ O ₃ | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,06 | 0,02 |
| Sm ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,01 |
| Eu ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Gd ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,01 |
| Tb ₂ O ₃ | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 |
| Dy ₂ O ₃ | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Ho ₂ O ₃ | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,05 | 0,01 |
| Er ₂ O ₃ | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| Tm ₂ O ₃ | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,00 |
| Yb ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Lu ₂ O ₃ | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,01 |
| ThO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,46 | 0,11 |
| UO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

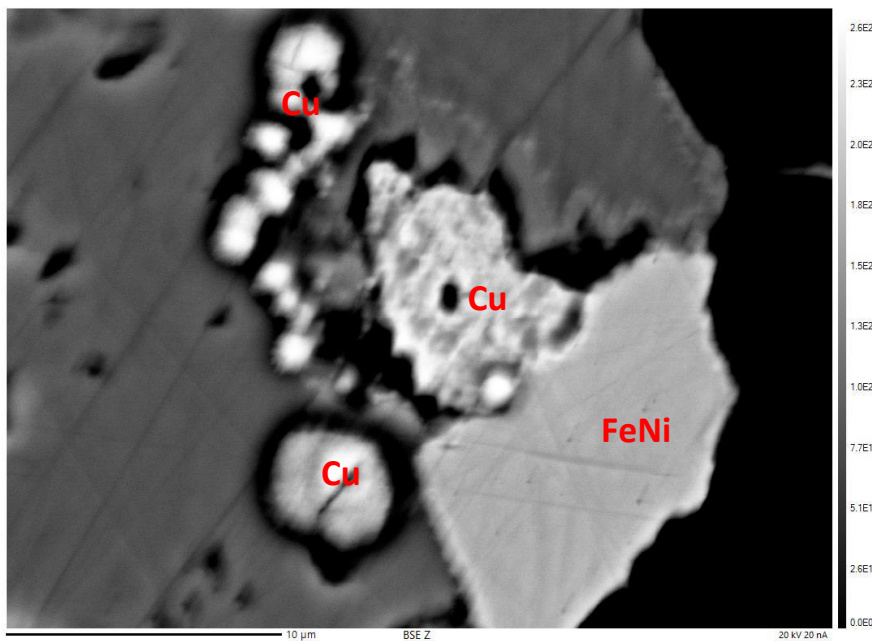
Miedź

W chondrycie Tamdakht zaobserwowano również ziarna miedzi rodzimej. Na rysunku 8.46 przedstawiono wykres WDS wykonany dla jednego z tych ziaren.

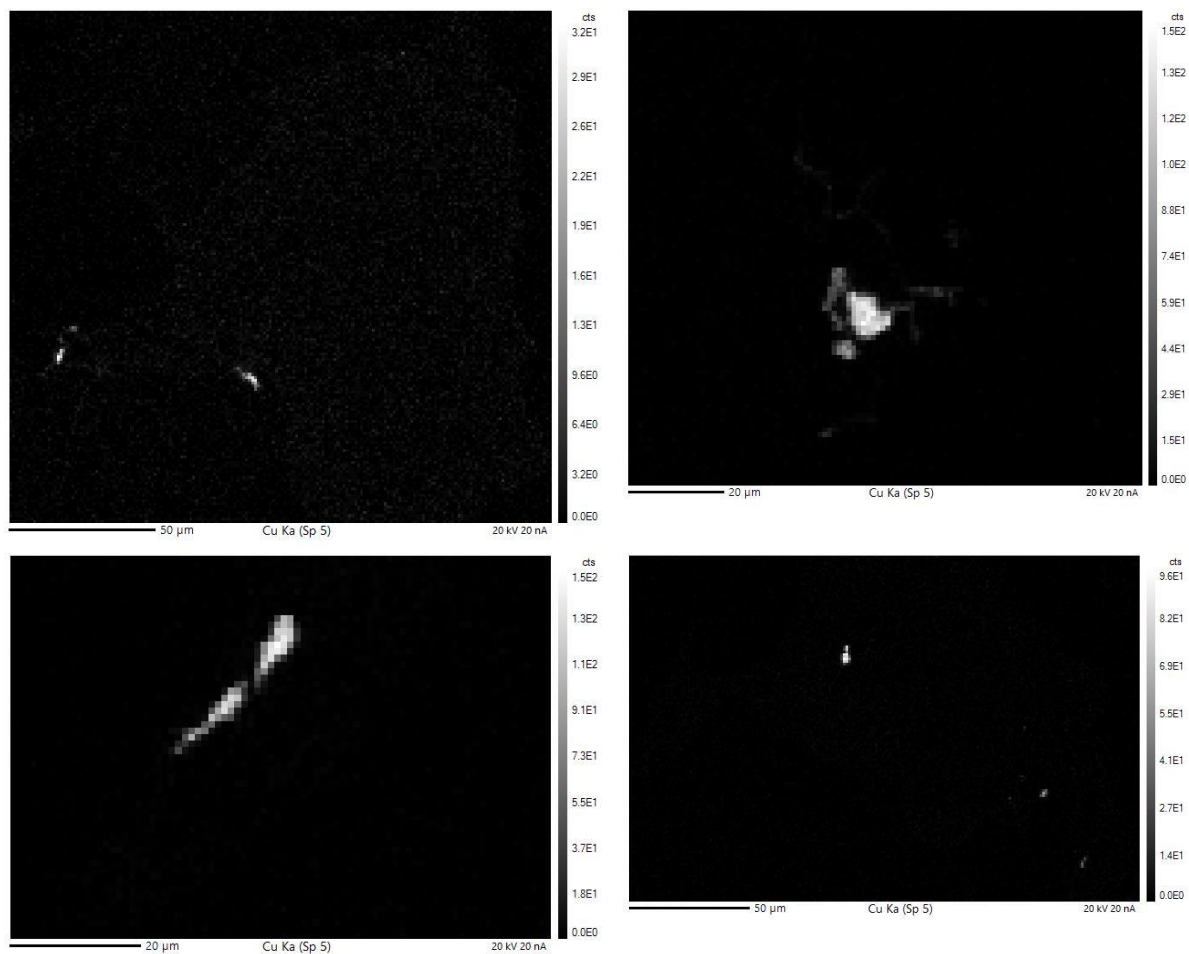


Rysunek 8.46. Wykres WDS dla wybranego ziarna miedzi rodzimej

Na rysunku 8.47 przedstawiono obraz BSE ze stosunkowo dużym ziarnem miedzi w chondrycie Tamdakht (najjaśniejsza faza mineralna). Na rysunku 8.48 przedstawiono mapy rozkładu zawartości miedzi, na których wyraźnie widać koncentracje tego pierwiastka w miejscach, gdzie występują ziarna miedzi rodzimej.



Rysunek 8.47. Ziarno miedzi rodzimej w chondrycie Tamdakht (obraz BSE)



Rysunek 8.48. Ziarna miedzi rodzimej uchwycone na mapach rozkładu zawartości Cu w meteorycie Tamdakht

8.2.2. NWA 6410

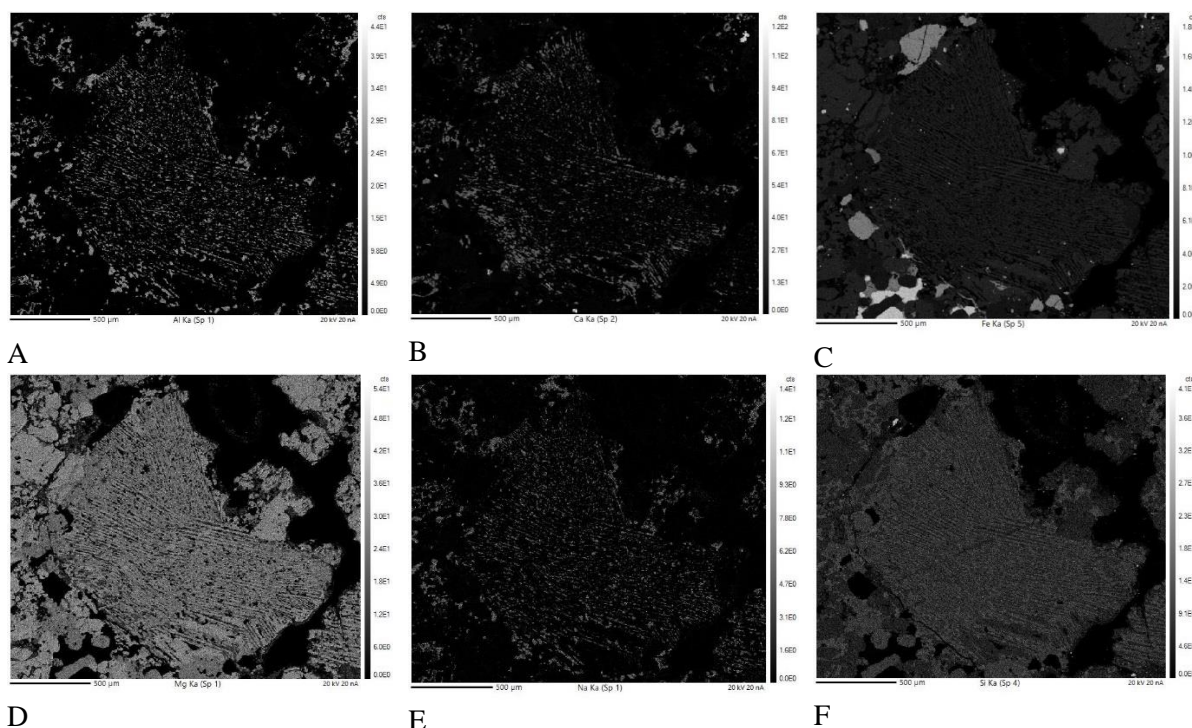
Krzemiany i glinokrzemiany

W meteorycie NWA 6410 wykonano analizę składu chemicznego oliwinów, piroksenów oraz skaleni. W tabeli 8.6 przedstawiono skład tlenkowy tych minerałów. Chociaż w tej pracy nie jest rozważane wykorzystanie tego typu minerałów do pozyskiwania surowców, należy zwrócić uwagę, że takie prace prowadzone są w innych ośrodkach naukowych. Zasadnym jest więc podkreślenie, że minerały te mogą być w przyszłości również źródłem wybranych metali (Balasubramaniam i in., 2010; Schwandt i in., 2012; Rasera i in., 2020; Meurisse i in., 2022).

Tabela 8.6. Skład tlenkowy krzemianów i glinokrzemianów w meteorycie NWA 6410

| tlenek | oliwin | | | piroksen | | | skaleń | | |
|--------------------------------|--------|-------|---------|----------|-------|---------|--------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia |
| | % | | | | | | | | |
| | n = 9 | | | n = 7 | | | n = 4 | | |
| MgO | 38,98 | 40,16 | 39,54 | 29,33 | 29,80 | 29,54 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| MnO | 0,43 | 0,48 | 0,46 | 0,46 | 0,48 | 0,48 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| NiO | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | - | - | - |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,15 | 0,28 | 0,20 | - | - | - |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,11 | 0,21 | 0,16 | - | - | - |
| SiO ₂ | 38,30 | 39,12 | 38,69 | 55,50 | 56,06 | 55,85 | 64,96 | 67,68 | 66,13 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,03 | 5,58 | 9,51 | 8,29 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,13 | 0,25 | 0,17 | 21,40 | 22,48 | 22,08 |
| CaO | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,85 | 1,04 | 0,95 | 2,19 | 2,28 | 2,23 |
| FeO | 22,77 | 23,72 | 23,46 | 14,11 | 14,52 | 14,29 | 0,40 | 0,75 | 0,53 |
| K ₂ O | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,72 | 0,97 | 0,83 |
| BaO | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,06 | 0,03 |

W czasie badań analizie poddano także interesującą chondrę piroksenową. W obszarze, w którym się znajduje wykonano mapy koncentracji pierwiastków dla: glinu (A), wapnia (B), żelaza (C), magnezu (D), sodu (E) oraz krzemu (F) (Rysunek 8.49).



Rysunek 8.49. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków chondry piroksenowej. A – glin, B – wapń, C – żelazo, D – magnez, E – sód, F – krzem

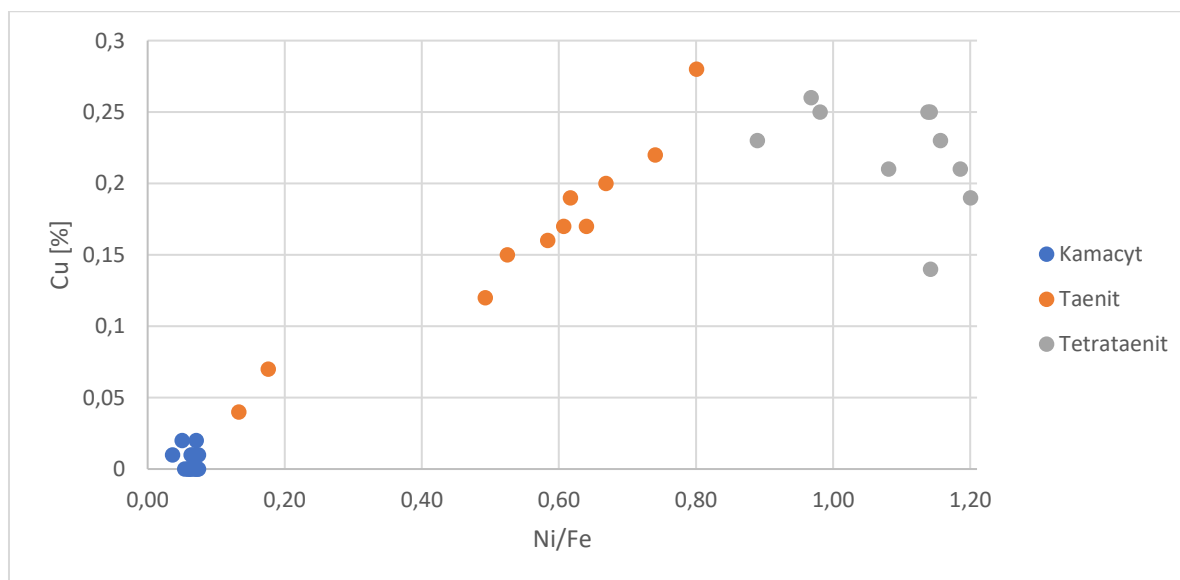
Stop FeNi

W meteorycie NWA 6410 zaobserwowano występowanie kamacytu, taenitu oraz tetrataenitu. W tabeli 8.7 przedstawiono skład chemiczny poszczególnych faz mineralnych stopu FeNi. Zgodnie z oczekiwaniem kamacyt jest wzbogacony w kobalt (średnio 0,64%),

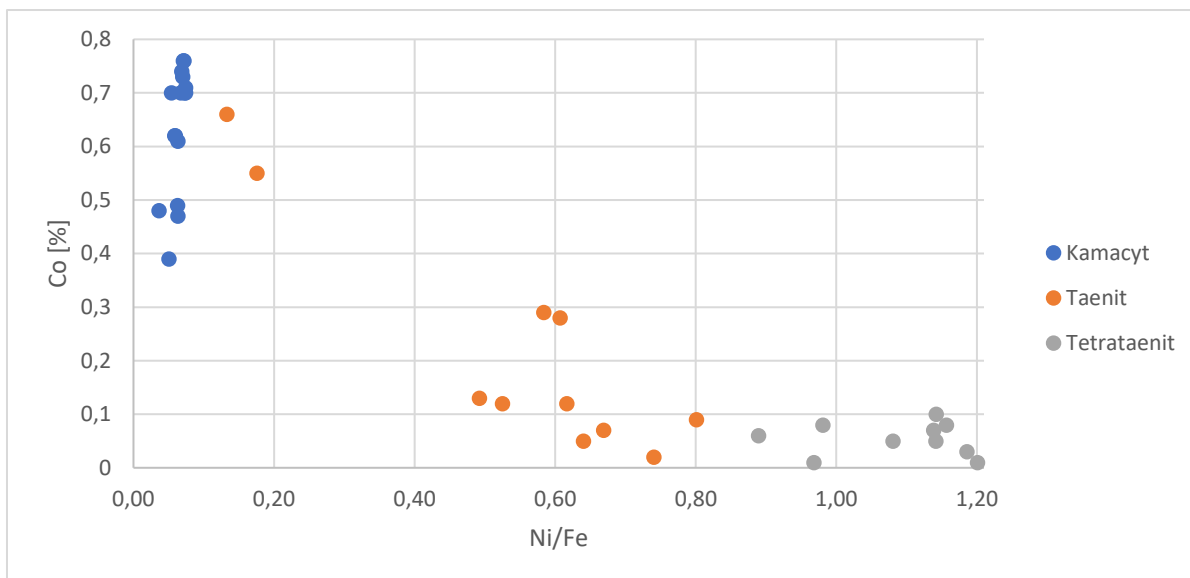
natomiast taenit oraz tetrataenit w miedź (średnia odpowiednio 0,16% oraz 0,22%). Na rysunkach 8.50 oraz 8.51 przedstawiono wykresy zależności występowania kobaltu oraz miedzi od wartości stosunku zawartości Ni/Fe. Warto zauważyć, że zawartość Cu w taenicie rośnie wraz ze wzrostem zawartości Ni, natomiast w tetrataenicie zawartość Cu jest niemal stała. Odwrotnie sytuacja wygląda dla kobaltu, gdzie większa koncentracja występuje w kamacycie, zaś w taenicie i tetrataenicie jest wyraźnie niższa.

Tabela 8.7. Skład chemiczny stopu FeNi w meteorycie NWA 6410

| pierwiastek | kamacyt | | | taenit | | | tetrataenit | | |
|-------------|---------|-------|---------|--------|-------|---------|-------------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia |
| | % | | | | | | | | |
| | n = 16 | | | n = 11 | | | n = 10 | | |
| Mg | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Al | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Si | 0,00 | 0,58 | 0,05 | 0,00 | 0,25 | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| P | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| S | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Ti | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| Cr | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 0,02 | 0,00 | 0,25 | 0,04 |
| Mn | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Fe | 92,38 | 95,87 | 93,44 | 55,20 | 87,10 | 65,57 | 45,18 | 52,66 | 47,62 |
| Co | 0,39 | 0,76 | 0,64 | 0,02 | 0,66 | 0,22 | 0,01 | 0,10 | 0,05 |
| Ni | 3,45 | 6,87 | 5,92 | 11,57 | 44,20 | 33,67 | 46,83 | 54,32 | 51,58 |
| Cu | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,28 | 0,16 | 0,14 | 0,26 | 0,22 |
| Zn | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 |

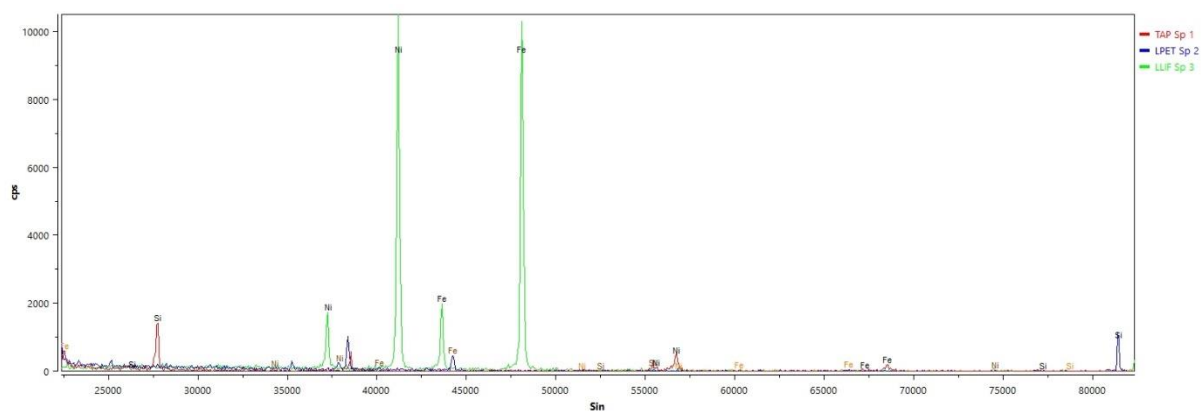


Rysunek 8.50. Zależność zawartości miedzi od stosunku Ni/Fe dla stopu FeNi w meteorycie NWA 6410



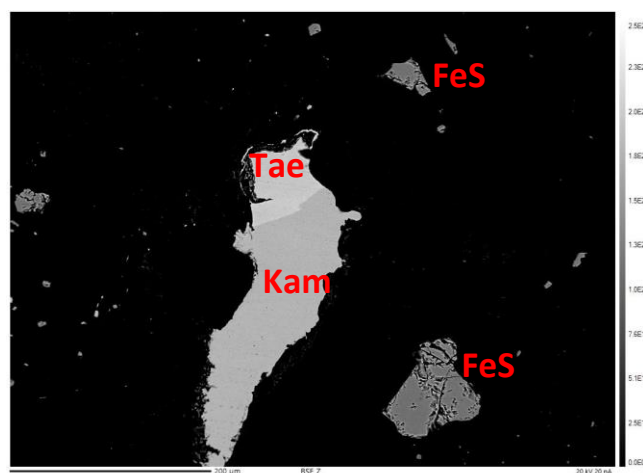
Rysunek 8.51. Zależność zawartości kobaltu od stosunku Ni/Fe dla stopu FeNi w meteorycie NWA 6410

Na rysunku 8.52 przedstawiono wykresy WDS kamacytu.



Rysunek 8.52. Wykres WDS kamacytu pochodzącego z meteorytu NWA 6410

Na rysunku 8.53 przedstawiono obraz BSE kamacytu oraz taenitu.



Rysunek 8.53. Ziarno stopu FeNi w meteorycie NWA 6410 (obraz BSE). Faza jaśniejsza – taenit, faza ciemniejsza – kamacyt

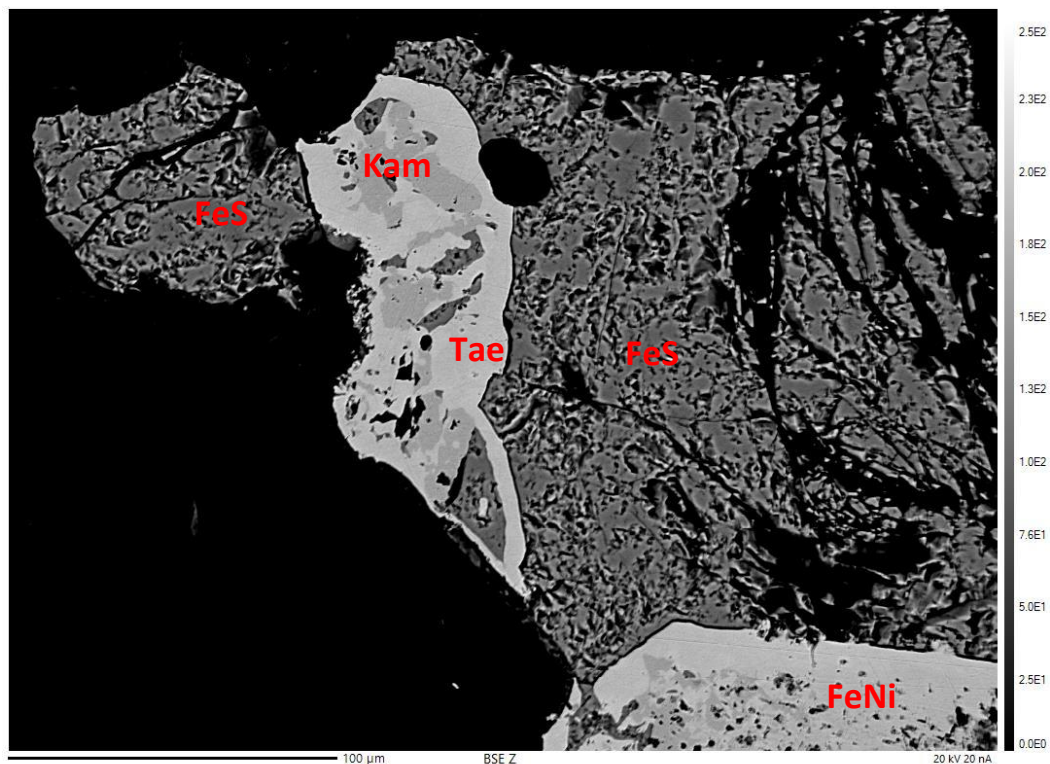
Troilit (FeS)

W meteorycie NWA 6410 zaobserwowano liczne ziarna troilitu. W tabeli 8.8 przedstawiono jego skład chemiczny. Skład siarczku żelaza jest niemal stały.

Tabela 8.8. Skład chemiczny troilitu w meteorycie NWA 6410

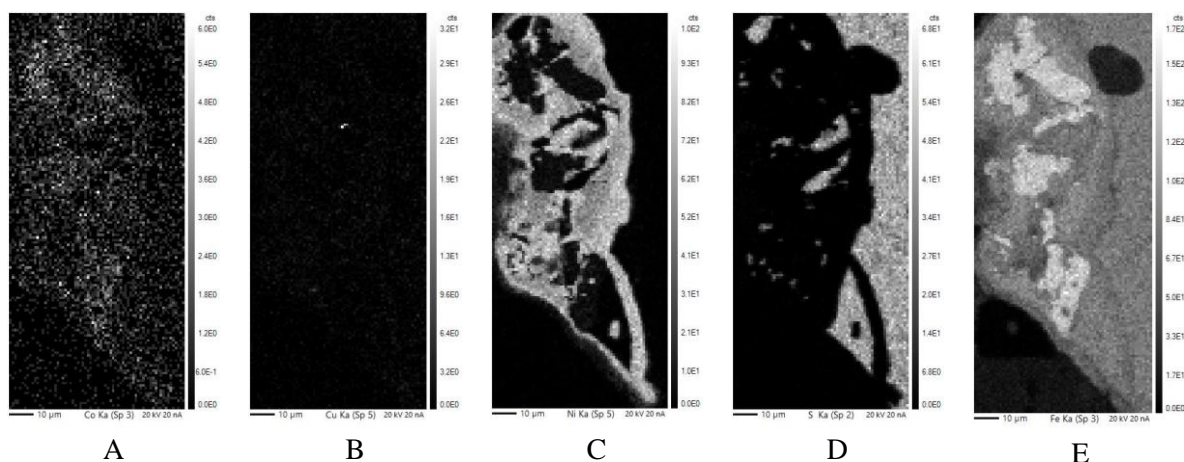
| pierwiastek | troilit | | |
|-------------|---------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia |
| | % | | |
| | n = 24 | | |
| Mg | 0,01 | 0,10 | 0,01 |
| Al | 0,00 | 0,43 | 0,02 |
| Si | 0,00 | 0,07 | 0,02 |
| P | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| S | 35,43 | 37,55 | 36,36 |
| Ti | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Cr | 0,00 | 0,04 | 0,01 |
| Mn | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| Fe | 60,69 | 63,63 | 62,76 |
| Co | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ni | 0,00 | 0,07 | 0,02 |
| Cu | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Zn | 0,00 | 0,03 | 0,01 |

Na rysunku 8.54 przedstawiono duże ziarno troilitu współwystępujące z ziarnem stopu FeNi (obraz BSE). Widoczne są strefy odmieszania stopu, a także porowata struktura troilitu.



Rysunek 8.54. Ziarno troilitu (ciemnoszare, porowate) oraz ziarno stopu FeNi (jasny – taenit, ciemniejszy – kamacyt)

Na rysunku 8.55 przedstawiono mapy rozkładu koncentracji pierwiastków dla kobaltu, miedzi, niklu, siarki oraz żelaza w obszarze przedstawionym na rysunku 8.54.



Rysunek 8.55. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków w ziarnach stopu FeNi oraz troilitu w meteorycie NWA 6410. A – kobalt, B – miedź, C – nikiel, D – siarka, E – żelazo

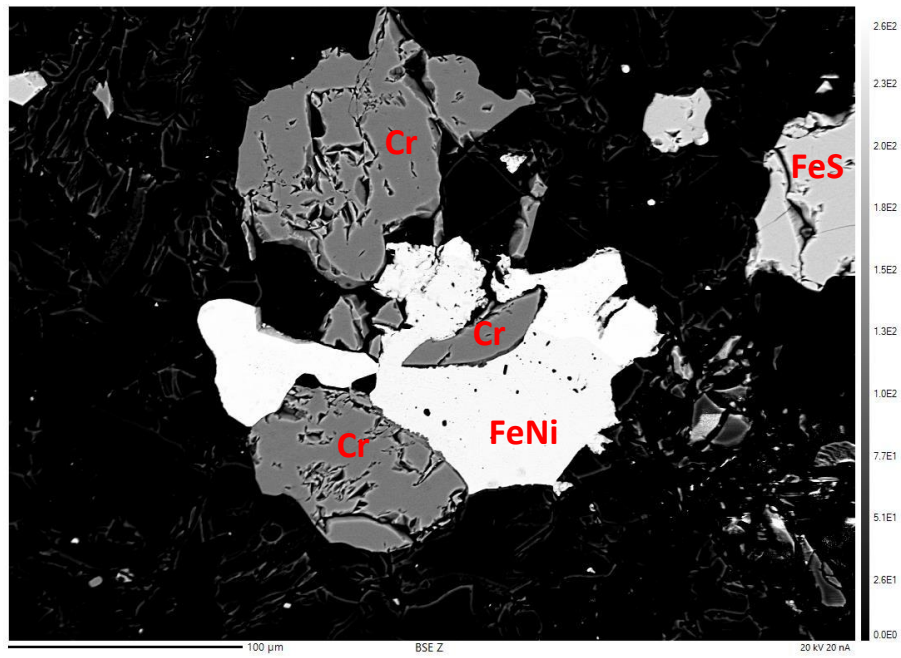
Chromit

Zaobserwowano także ziarna chromitu. W tabeli 8.9 przedstawiono skład tlenkowy badanych ziaren chromitu. Przy rozważaniu eksploatacji chromu, przy okazji pozyskiwane mogłyby być również tytan, mangan, żelazo, cynk oraz wanad, które wykazują znaczne wzbogacenie w tym mineralu w stosunku do pozostałych minerałów występujących w chondrytach zwyczajnych. W porównaniu z chromitem w meteorycie Tamdakht, chromit z meteorytu NWA 6410 zawiera więcej tlenku tytanu (3,11% wobec 1,50%).

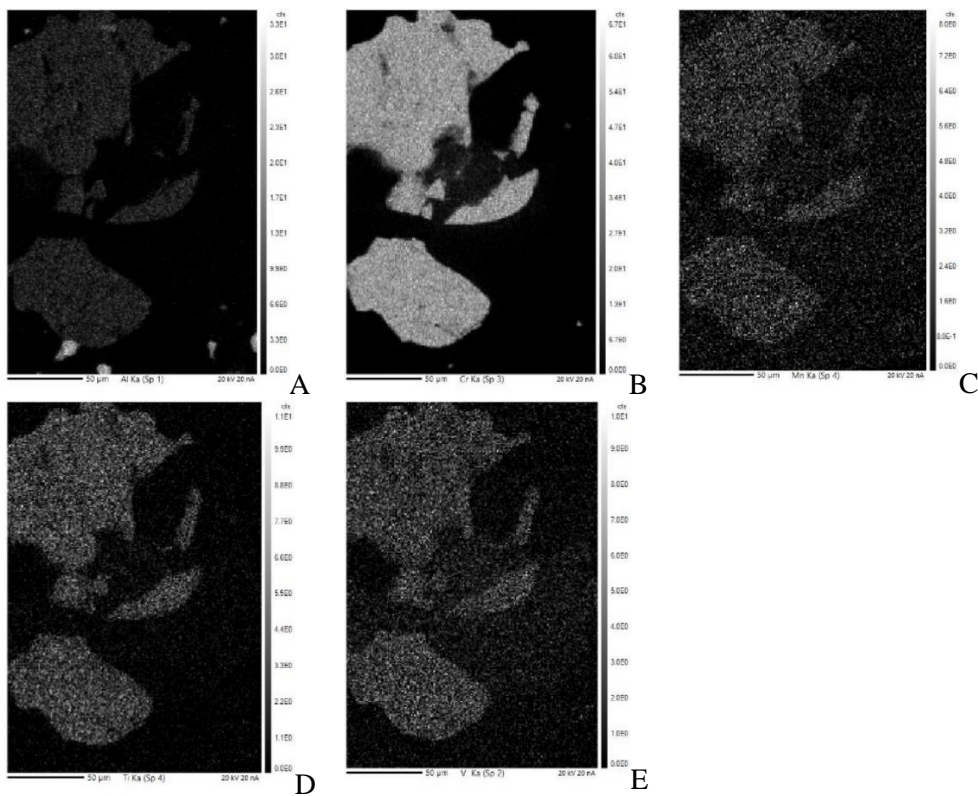
Tabela 8.9. Skład chemiczny chromitu w meteorycie NWA 6410

| tlenek | chromit | | |
|--------------------------------|---------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia |
| | % | | |
| | n = 20 | | |
| MgO | 1,99 | 2,92 | 2,37 |
| Al ₂ O ₃ | 4,60 | 6,81 | 5,94 |
| CaO | 0,00 | 0,06 | 0,02 |
| TiO ₂ | 2,67 | 3,33 | 3,11 |
| MnO | 0,67 | 0,87 | 0,78 |
| FeO | 30,55 | 32,26 | 31,66 |
| NiO | 0,00 | 0,03 | 0,01 |
| SiO ₂ | 0,01 | 0,19 | 0,06 |
| Cr ₂ O ₃ | 53,90 | 55,66 | 55,05 |
| CoO | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ZnO | 0,20 | 0,35 | 0,28 |
| V ₂ O ₃ | 0,75 | 0,83 | 0,79 |

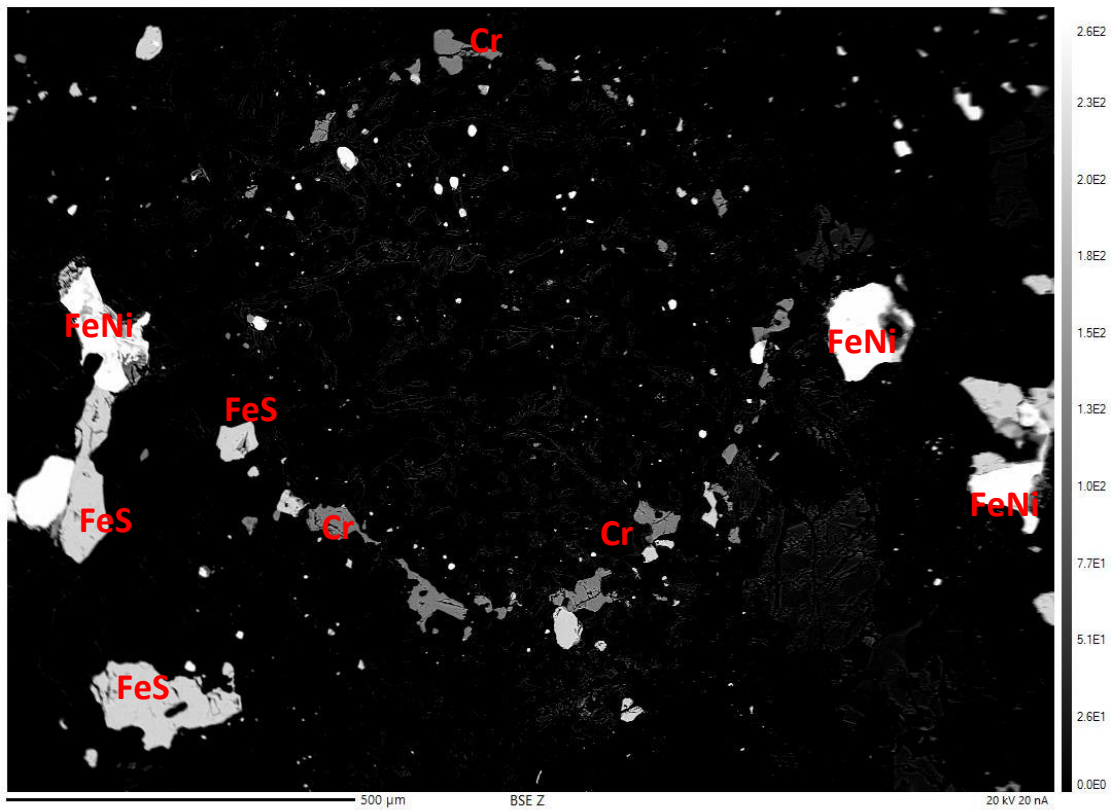
Chromit w meteorycie NWA 6410 występuje w otoczkach chondr (rysunki 8.58 oraz 8.59) oraz w asocjacji z innymi minerałami (rysunek 8.56). Dla przedstawionych obszarów wykonano mapy rozkładu zawartości pierwiastków (rysunki 8.57, 8.60 oraz 8.61).



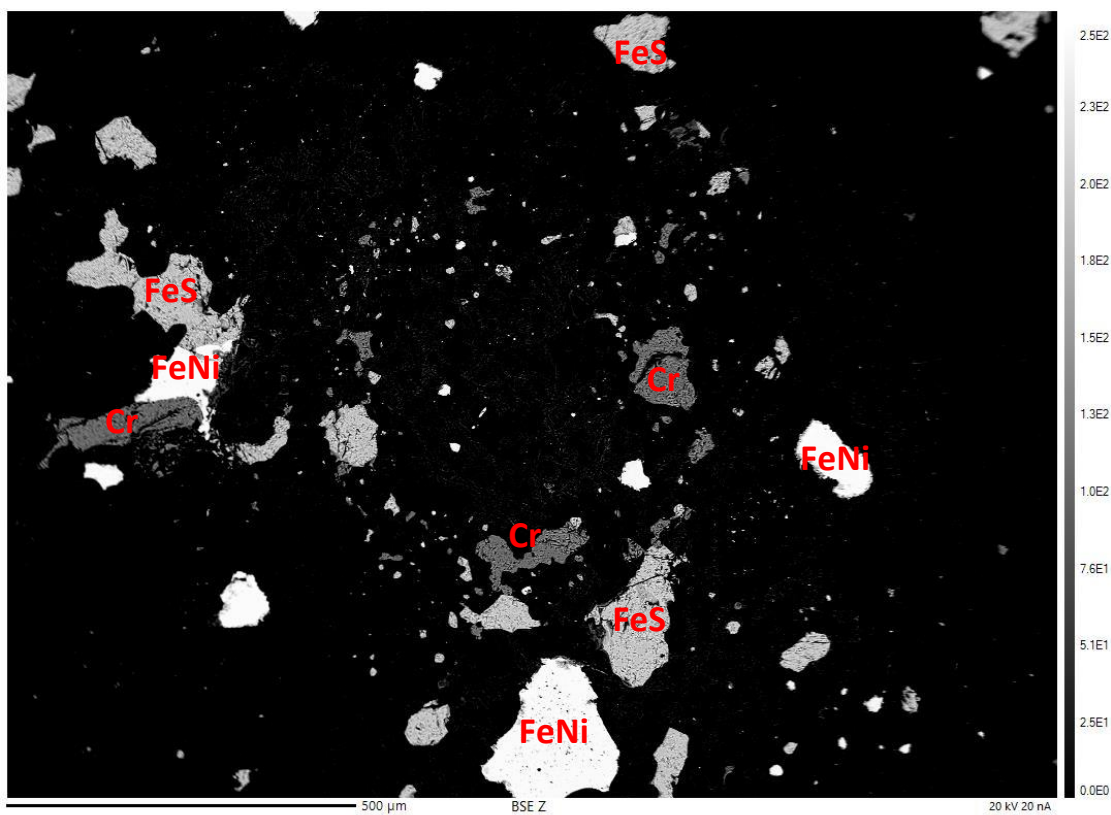
Rysunek 8.56. Ziarno chromitu (ciemny szary) oraz ziarno stopu FeNi (białe). Po prawej widoczne także ziarno troilitu (jasnoszare) – obraz BSE



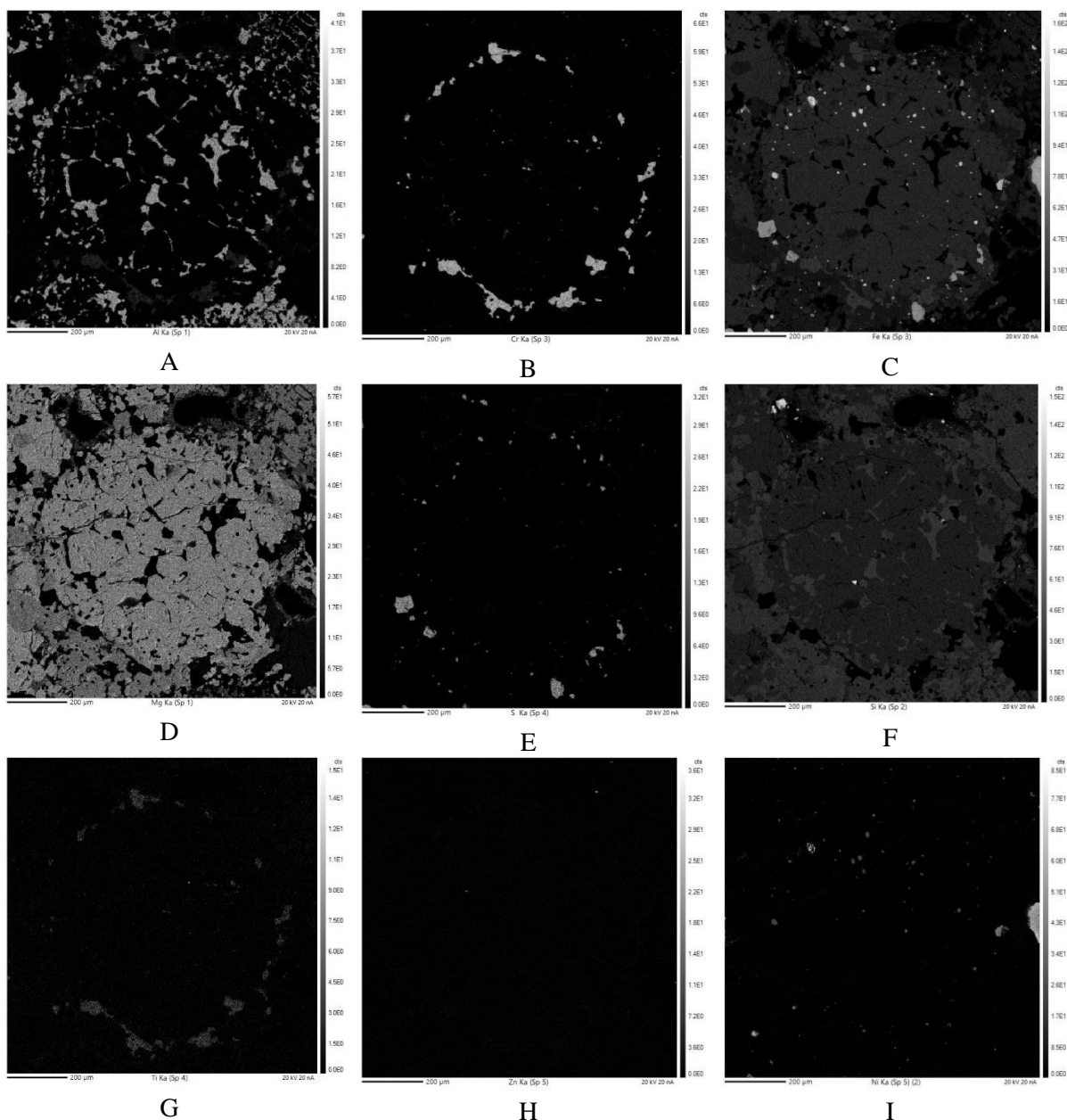
Rysunek 8.57. Mapa rozkładu zawartości pierwiastków w chromicie z obszaru przedstawionego na rysunku 8.56. A – glin, B – chrom, C – mangan, D – tytan, E – wanad



Rysunek 8.58. Obraz BSE chondry, wokół której znajdują się ziarna chromitu, troilitu oraz stopu FeNi

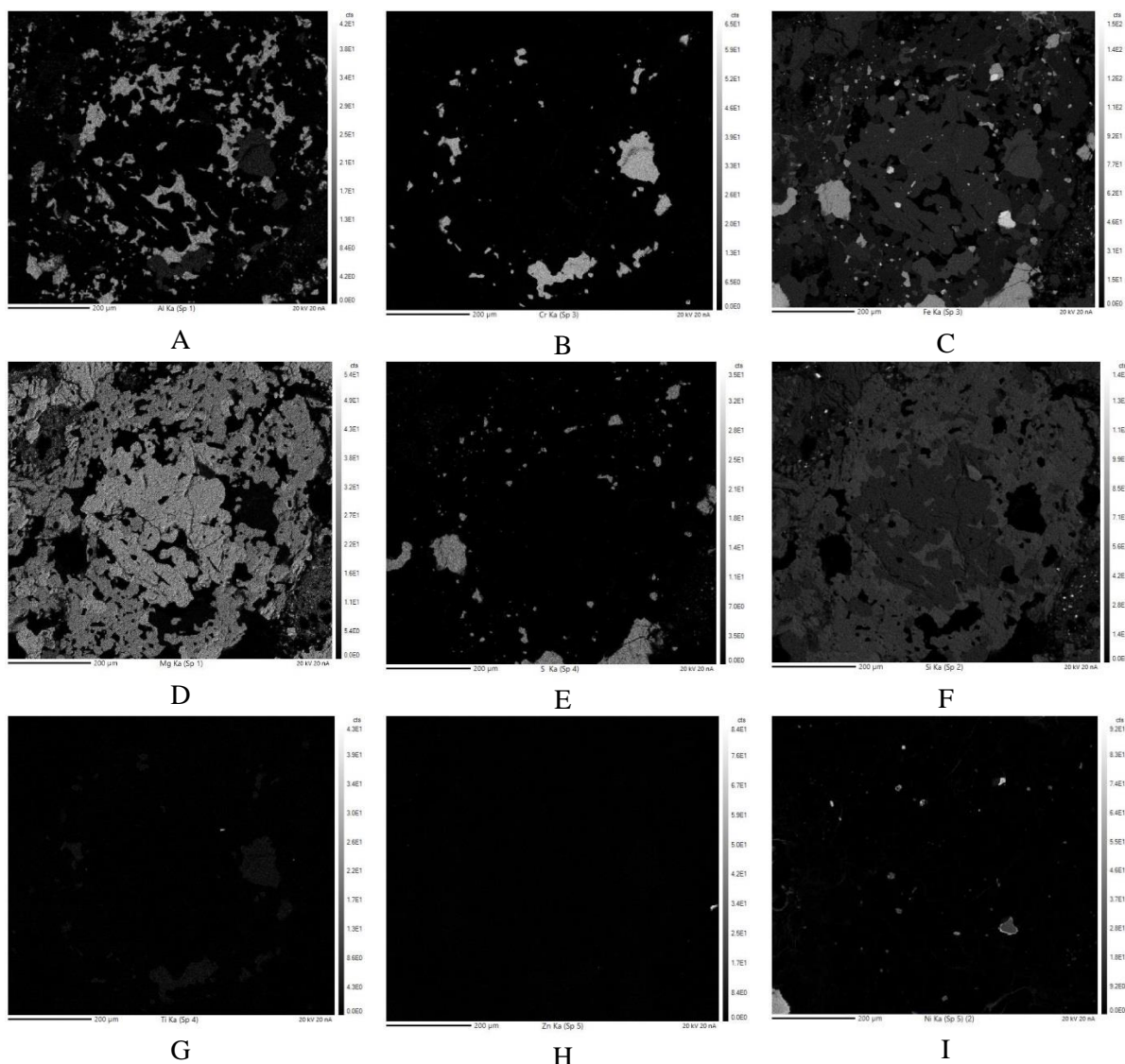


Rysunek 8.59. Obraz BSE chondry, wokół której znajdują się ziarna chromitu, troilitu oraz stopu FeNi



Rysunek 8.60. Mapy rozkładu zawartości pierwiastków dla obszaru przedstawionego na rysunku 8.58. A – glin, B – chrom, C – żelazo, D – magnez, E – siarka, F – krzem, G – tytan, H – cynk, I – nikiel

Analizując mapy rozkładu zawartości pierwiastków przedstawione na rysunku 8.60, można zauważyć również, że w chondrze tej lub w jej okolicach występuje kwarc (lub jedna z odmian polimorficznych SiO_2 , np. cristobalit lub trydymit) (białe punkty na rysunku F), a także miejsca większej koncentracji tytanu (białe punkty wewnątrz chondry na rysunku G) oraz cynku (białe punkty na rysunku H). Dane te wskazują również na potencjał rudy chondrytowej jako źródła innych metali. Drobne ziarna bogate w tytan to prawdopodobnie rutyl (TiO_2), natomiast ziarna bogate w cynk to jeden z siarczków cynku.



Rysunek 8.61. Mapy rozkładu zawartości pierwiastków dla obszaru przedstawionego na rysunku 8.59. A – glin, B – chrom, C – żelazo, D – magnez, E – siarka, F – krzem, G – tytan, H – cynk, I – nikiel

Również analizując mapy rozkładu zawartości pierwiastków na rysunku 8.61, można zauważyć ziarna mineralne o wzorze ogólnym SiO_2 (np. kwarc), a także pojedyncze miejsca koncentracji tytanu oraz cynku. Widoczne jest także występowanie ziaren tlenków tytanu oraz siarczków cynku w pobliżu występowania chromitu.

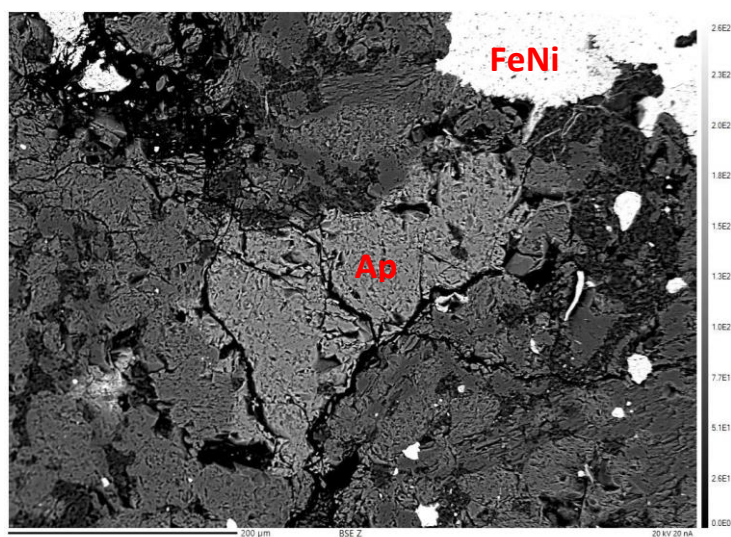
Fosforany

W chondrycie NWA 6410, podobnie jak w meteorycie Tamdakht, zaobserwowano liczne fosforany, głównie merillity. W tabeli 8.10 przedstawiono skład chemiczny ziaren fosforanów. Fosforany są nieznacznie wzbogacone w pierwiastki ziem rzadkich, które również są potencjalnym surowcem dla eksploatacji górniczej.

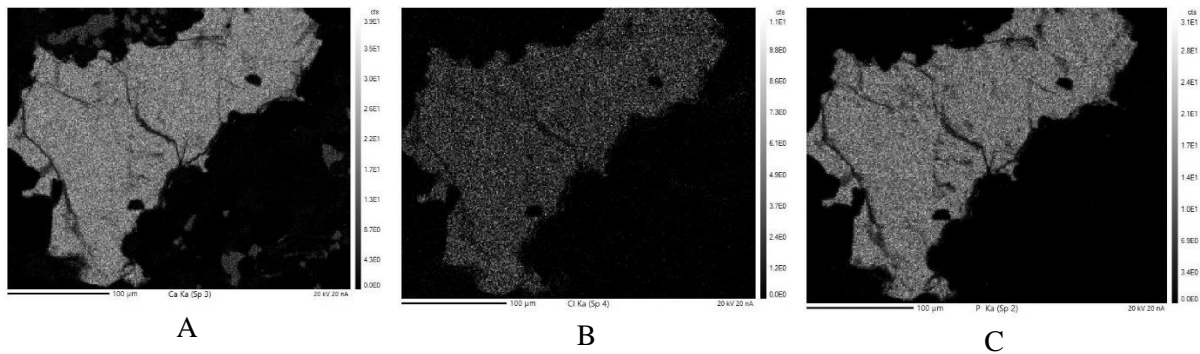
Tabela 8.10. Skład chemiczny fosforanów w meteorycie NWA 6410

| składnik | apatyt | | | merillit | | |
|--------------------------------|--------|-------|---------|----------|-------|---------|
| | Min | Max | średnia | Min | Max | średnia |
| | % | | | | | |
| | n = 8 | | | n = 2 | | |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cl | 2,29 | 4,89 | 3,56 | 0,01 | 0,03 | 0,02 |
| Na ₂ O | 0,28 | 0,53 | 0,36 | 3,22 | 3,49 | 3,36 |
| SiO ₂ | 0,08 | 0,35 | 0,15 | 0,16 | 0,20 | 0,18 |
| P ₂ O ₅ | 39,89 | 40,74 | 40,35 | 43,65 | 43,81 | 43,73 |
| SO ₂ | 0,00 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,02 |
| CaO | 54,06 | 57,82 | 55,95 | 46,82 | 48,55 | 47,69 |
| MgO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4,00 | 4,25 | 4,13 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Y ₂ O ₃ | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,04 |
| La ₂ O ₃ | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Ce ₂ O ₃ | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,02 |
| Pr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Nd ₂ O ₃ | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Sm ₂ O ₃ | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Eu ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Gd ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,02 |
| Tb ₂ O ₃ | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,02 |
| Dy ₂ O ₃ | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ho ₂ O ₃ | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Er ₂ O ₃ | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Tm ₂ O ₃ | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Yb ₂ O ₃ | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Lu ₂ O ₃ | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,07 | 0,04 |
| ThO ₂ | 0,00 | 0,60 | 0,22 | 0,00 | 0,23 | 0,12 |
| UO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Na rysunku 8.62 przedstawiono obraz BSE apatyty. Na rysunku 8.63 przedstawiono mapy rozkładu zawartości pierwiastków w tym ziarnie dla wapnia, chloru oraz fosforu.



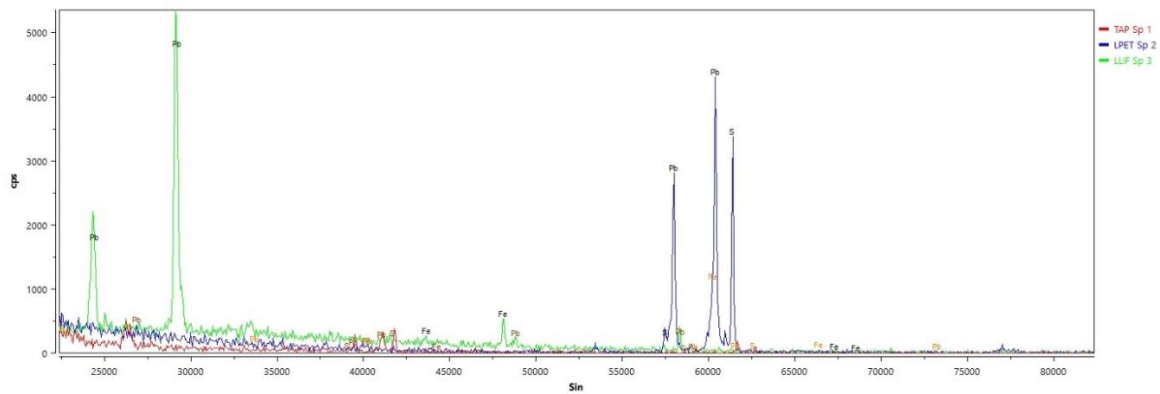
Rysunek 8.62. Obraz BSE ziarna apatyty (jasnoszare).



Rysunek 8.63. Mapy rozkładu zawartości pierwiastków ziarna apatytu przedstawionego na rysunku 8.62. A – wapń, B – chlor, C – fosfor

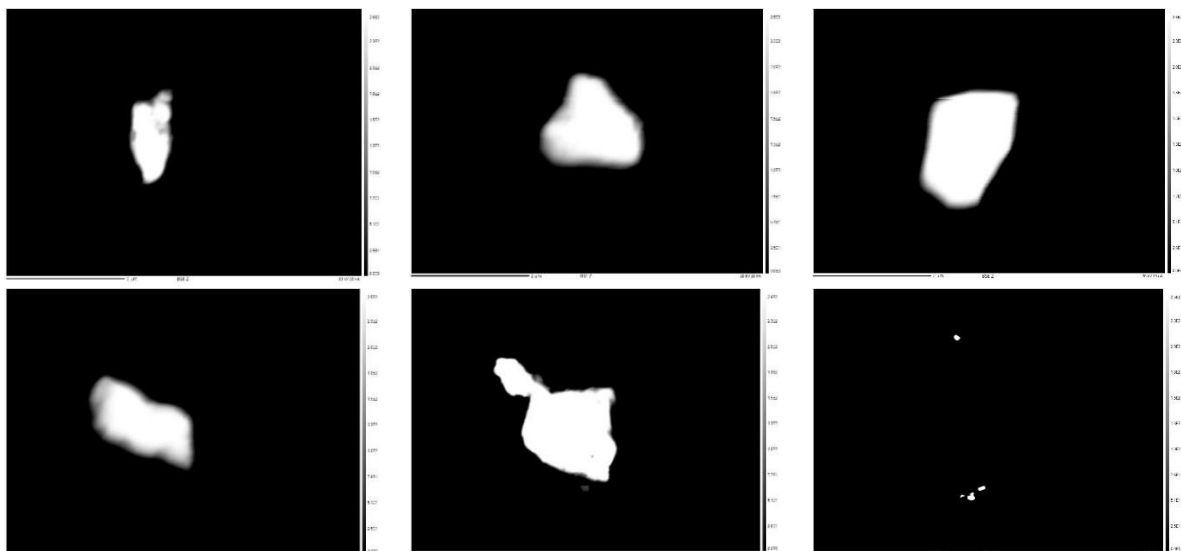
Galena

W chondrycie NWA 6410 nie zaobserwowano ziaren metalicznej miedzi, ale zaobserwowano galenę. Galena występująca w meteorytach może być minerałem pierwotnym, ale także produktem procesów zachodzących na Ziemi. Na rysunku 8.64 przedstawiono wykres WDS wykonany na jednym z ziaren.



Rysunek 8.64. Wykres WDS dla ziarna galeny odnalezionej w meteorycie NWA 6410

Na rysunku 8.65 przedstawiono obrazy BSE z ziarnami galeny w chondrycie NWA 6410.



Rysunek 8.65. Ziarna galeny uchwycone na mapach rozkładu zawartości pierwiastków w meteorycie NWA 6410

8.3. Analiza ziarnowa nadawy do procesów przeróbczych

8.3.1. Tamdakht

Do badań przeznaczono 267 g meteorytu Tamdakht. Po wstępnym skruszeniu oraz zmieleniu, uzyskaną nadawę do procesów przeróbczych podzielono na trzy frakcje. Aż 81,46% całkowitej masy skały rudnej znalazło się we frakcji poniżej 100 μm (Tabela 8.11).

Tabela 8.11. Skład ziarnowy nadawy z meteorytu Tamdakht

| klasa ziarnowa μm | masa g | skumulowana masa g | zawartość klasy w nadawie % | skumulowana zawartość klasy w nadawie % |
|------------------------------|--------|--------------------|-----------------------------|---|
| 0-100 | 215,17 | 215,17 | 81,46 | 81,46 |
| 100-500 | 40,31 | 255,48 | 15,26 | 96,72 |
| >500 | 8,66 | 264,14 | 3,28 | 100,00 |

Najszybciej wydzielona została frakcja powyżej 500 μm (Tabela 8.12). Prawdopodobnie wynikało to głównie z obecności dużo mniejszych ziaren krzemianów, przywierających do siebie dość słabo siłami kohezji, dużych ziaren stopu FeNi oraz troilitu, które nie poddawały się mieleniu ręcznemu przy użyciu moździerza agatowego. Pozostałe dwie frakcje otrzymane zostały ostatecznie po sześciokrotnym powtórzeniu mielenia. W tabeli 8.12 przedstawiono masy poszczególnych frakcji po kolejnych etapach analizy sitowej. Po pierwszym mieleniu w młynku kulowym rozdzielono nadawę na: R (poniżej 500 μm) oraz M (powyżej 500 μm). Frakcja R była mielona następnie ręcznie przy użyciu moździerza agatowego. Frakcja M była najpierw mielona w młynku kulowym, a od etapu czwartego również była mielona ręcznie w moździerzu agatowym. W trakcie przeprowadzania rozdrobnienia skały rudnej ubyło około 3 g materiału badawczego, czyli nieco ponad 1% masy.

Tabela 8.12. Przebieg procesu mielenia meteorytu Tamdakht

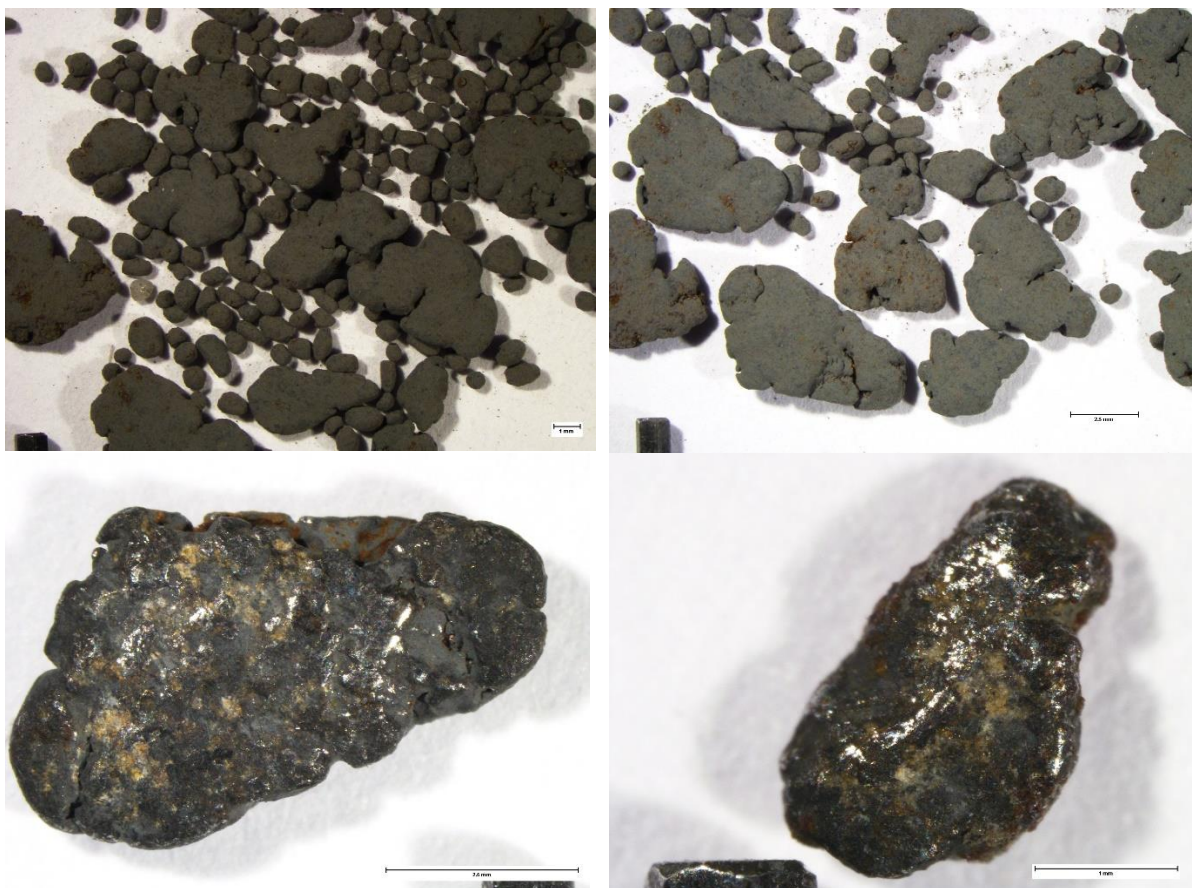
| etap | próbka | masa, g | | | | $\Delta\Sigma$ |
|------|----------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------|----------------|
| | | <100 μm | 100-500 μm | >500 μm | Σ | |
| I | Nadawa | 119,34 | | 147,75 | 267,09 | - |
| II | R | 149,68 | 64,97 | | 214,65 | -0,91 |
| | M | 15,6 | 35,93 | | 51,53 | |
| | Σ | 165,28 | 100,90 | | 266,18 | |
| III | R | 177,78 | 36,67 | | 214,45 | -0,20 |
| | M | 16,21 | 34,65 | | 50,86 | -0,67 |
| | Σ | 193,99 | 71,32 | | 265,31 | -0,87 |
| IV | R | 188,90 | 25,29 | - | 214,19 | -0,26 |
| | M | 16,75 | 25,22 | 8,66 | 50,63 | -0,23 |
| | Σ | 205,65 | 50,51 | 8,66 | 264,82 | -0,49 |
| V | R | 193,96 | 20,01 | - | 213,97 | -0,22 |
| | M | 17,78 | 24,06 | 8,66 | 50,50 | -0,13 |
| | Σ | 211,74 | 44,07 | 8,66 | 264,47 | -0,35 |
| VI | R | 195,84 | 17,92 | - | 213,76 | -0,21 |
| | M | 19,33 | 22,39 | 8,66 | 50,38 | -0,12 |
| | Σ | 215,17 | 40,31 | 8,66 | 264,14 | -0,33 |

W tabeli 8.13 przedstawiono zmianę procentową masy poszczególnych frakcji po kolejnych etapach mielenia i przesiewania. Domielenie próbki zakończono, gdy różnica w masie pomiędzy etapami dla pozyskiwanych frakcji była mniejsza niż 10%.

Tabela 8.13. Zmiana masy poszczególnych frakcji w czasie mielenia meteorytu Tamdakht

| etap | próbka | zmiana masy | | | |
|------|----------|--------------------|-------|--------------------|--------|
| | | <100 μm | | >100 μm | |
| | | g | % | g | % |
| III | R | 28,10 | 18,77 | -28,30 | -43,56 |
| | M | 0,61 | 3,91 | -1,28 | -3,56 |
| | Σ | 28,71 | 17,37 | -29,58 | -29,32 |
| IV | R | 11,12 | 6,25 | -11,38 | -31,03 |
| | M | 0,54 | 3,33 | -0,77 | -2,22 |
| | Σ | 11,66 | 6,01 | -12,15 | -17,04 |
| V | R | 5,06 | 2,68 | -5,28 | -20,88 |
| | M | 1,03 | 6,15 | -1,16 | -3,42 |
| | Σ | 6,09 | 2,96 | -6,44 | -10,88 |
| VI | R | 1,88 | 0,97 | -2,09 | -11,66 |
| | M | 1,55 | 8,72 | -1,67 | -5,10 |
| | Σ | 3,43 | 1,62 | -3,76 | -7,13 |

Próbki frakcji 0-100 μm oraz 100-500 μm zostały skierowane do analizy QEMScan w celu oceny wzbogacenia w minerały stopu FeNi. Próbka frakcji powyżej 500 μm , z uwagi na brak możliwości analogicznej analizy, została poddana analizie mikroskopowej przy wykorzystaniu mikroskopu stereoskopowego. Na rysunku 8.66 przedstawiono wykonane zdjęcia ziaren frakcji powyżej 500 μm . Ziarna te są oblepione silnie przylegającym, bardzo drobnym materiałem frakcji pylastej, w którego skład wchodzi prawdopodobnie głównie krzemiany i w mniejszej ilości troilit. Po oczyszczeniu części ziaren frakcji powyżej 500 μm zaobserwowano, że są to ziarna stopu FeNi. Widoczne są także oznaki utleniania żelaza na powierzchni tych ziaren. Nie zaobserwowano występowania troilitu, jednak z uwagi na obserwowane podczas badań mikroskopowych wrostki siarczku żelaza w stopie FeNi, prawdopodobnie minerał ten występuje również w tych ziarnach w niewielkiej ilości. Poczynione obserwacje pozwalają na stwierdzenie, że co najmniej 95% masy frakcji powyżej 500 μm stanowi stop FeNi i należałoby go potraktować wspólnie z frakcją powyżej 100 μm jako jeden produkt. Z uwagi jednak na brak dokładnych danych dotyczących składu mineralnego oraz chemicznego tej frakcji rozważania te zostały opisane w osobnym punkcie.



Rysunek 8.66. Ziarna frakcji o średnicy powyżej 500 μm z meteorytu Tamdakht. Na górze ziarna po analizie sitowej, na dole ziarna oczyszczone z pyłu. Widoczne silnie odbijające światło powierzchnie to powierzchnie ziaren FeNi, natomiast lekko żółtawe powierzchnie stanowią niezidentyfikowane związki chemicznie utlenionego żelaza lub niezidentyfikowane minerały wchodzące w skład frakcji pylastej

8.3.2. NWA 6410

Do mielenia przy użyciu urządzenia Retsch Cryomill przeznaczono 28 g próbki meteorytu NWA 6410. Jednak po wykonaniu analizy ziarnowej w dalszym ciągu obserwowano stosunkowo duży uzysk frakcji powyżej 100 μm (tabela 8.14).

Do mielenia przy użyciu urządzenia Retsch Vibratory Disc Mill RS 200 przeznaczono 21,5 g próbki meteorytu NWA 6410. Dokonano analizy sitowej po 4 oraz po 8 minutach mielenia. Podobnie jak w przypadku Cryomilla, także tutaj uzyskano stosunkowo duży uzysk frakcji powyżej 100 μm (tabela 8.14).

Tabela 8.14. Wynik mielenia chondrytu NWA 6410 w urządzeniach Cryomill oraz RS 200

| urządzenie | frakcja poniżej 100 μm [%] | frakcja powyżej 100 μm [%] |
|-------------------|--|--|
| Cryomill | 90,9 | 9,1 |
| RS 200 (4 minuty) | 91,4 | 8,6 |
| RS 200 (8 minut) | 92,4 | 7,6 |

Eksperyment ten wskazał, że niemożliwe jest rozdrobnienie ziaren stopu FeNi z uwagi na ich zbyt dużą plastyczność lub twardość. Uzyskane zmielone próbki meteorytu nie były poddawane dalszym analizom. Na podstawie przeprowadzonych testów podjęto decyzję o

kontynuowaniu rozdrabniania rudy chondrytowej metodą opracowaną przy meteorycie Tamdakht.

Do dalszych badań przeznaczono 223,3 g meteorytu NWA 6410. Po wstępnym skruszeniu oraz zmieleniu, uzyskaną nadawę do procesów przeróbczych podzielono na trzy frakcje. Aż 92,00% całkowitej masy skały rudnej znalazło się we frakcji poniżej 100 μm (Tabela 8.15).

Tabela 8.15. Skład ziarnowy nadawy z meteorytu NWA 6410

| klasa ziarnowa μm | masa g | skumulowana masa g | zawartość klasy w nadawie % | skumulowana zawartość klasy w nadawie % |
|------------------------------|--------|--------------------|-----------------------------|---|
| 0-100 | 202,5 | 202,5 | 92,00 | 92,00 |
| 100-500 | 15,4 | 217,9 | 7,00 | 99,00 |
| >500 | 2,2 | 220,1 | 1,00 | 100,00 |

Podobnie jak w przypadku chondrytu Tamdakht, najszybciej wydzielona została frakcja powyżej 500 μm (Tabela 8.16). Prawdopodobnie wynikało to głównie z obecności dużo mniejszych ziaren krzemianów, przywierających do siebie dość słabo siłami kohezji oraz dużych ziaren stopu FeNi oraz troilitu, które nie poddawały się mieleniu ręcznemu przy użyciu młódczka agatowego. Pozostałe dwie frakcje otrzymane zostały ostatecznie po ośmiokrotnym powtórzeniu mielenia. W tabeli 8.16 przedstawiono masy poszczególnych frakcji po kolejnych etapach analizy sitowej. Nadawa była mielona najpierw w młynku kulowym, a od etapu piątego również była mielona ręcznie w młódczku agatowym. W trakcie przeprowadzania rozdrabniania skały rudnej ubyło około 2 g materiału badawczego, czyli około 1% masy.

Tabela 8.16. Przebieg procesu mielenia meteorytu NWA 6410

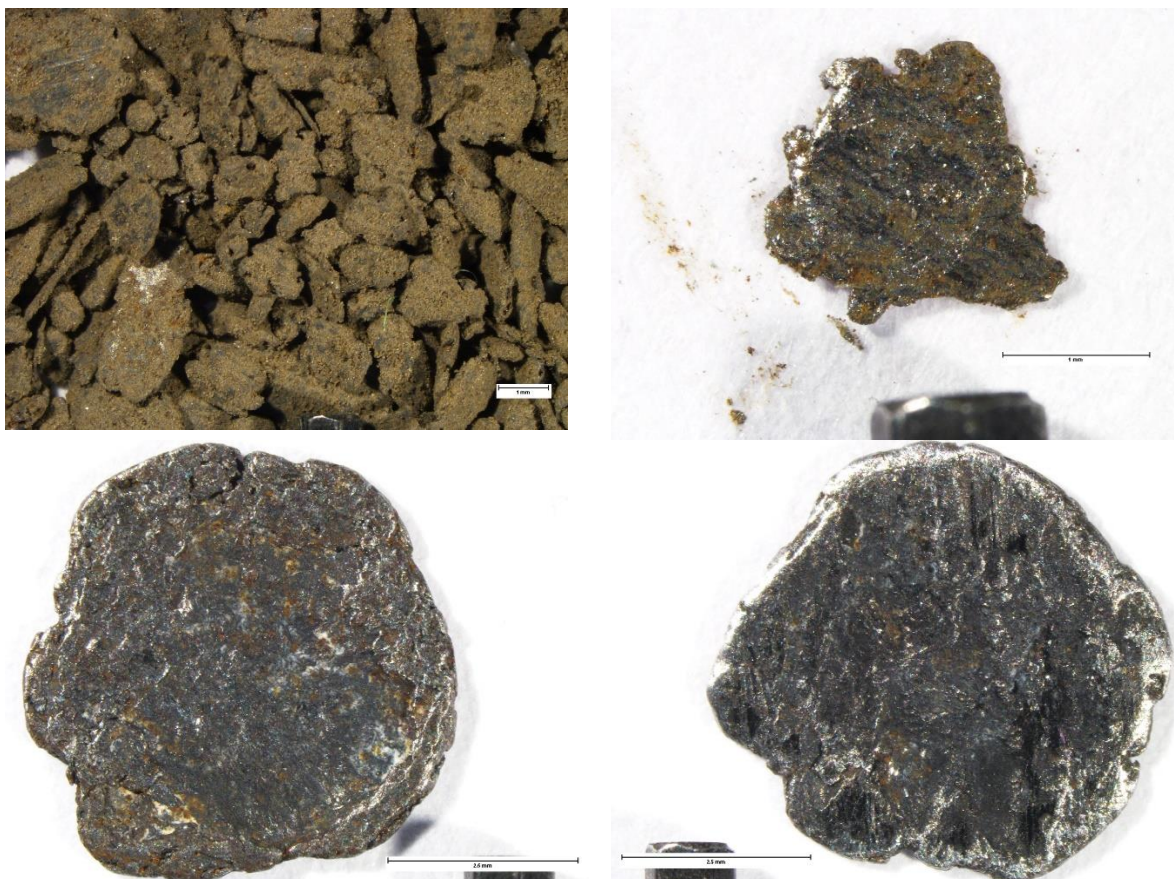
| etap | masa [g] | | | Σ | $\Delta\Sigma$ |
|--------|--------------------|-----------------------|--------------------|----------|----------------|
| | <100 μm | 100-500 μm | >500 μm | | |
| Nadawa | 221,5 | | | - | - |
| I | 129,0 | 88,5 | 3,2 | 220,7 | -0,8 |
| II | 165,1 | 53,2 | 2,4 | 220,7 | - |
| III | 184,0 | 34,4 | 2,2 | 220,6 | -0,1 |
| IV | 193,0 | 25,2 | 2,2 | 220,4 | -0,2 |
| V | 196,2 | 21,8 | 2,2 | 220,2 | -0,2 |
| VI | 198,3 | 19,6 | 2,2 | 220,1 | -0,1 |
| VII | 201,4 | 16,4 | 2,2 | 220,0 | -0,1 |
| VIII | 202,5 | 15,4 | 2,2 | 220,1 | +0,1 |

W tabeli 8.17 przedstawiono zmianę procentową masy poszczególnych frakcji po kolejnych etapach mielenia i przesiewania. Domielenie próbki zakończono, gdy masa frakcji < 100 μm przekroczyła 200 g, natomiast różnica w masie pomiędzy etapami dla pozyskiwanych frakcji była mniejsza niż 10%.

Tabela 8.17. Zmiana masy poszczególnych frakcji w czasie mielenia meteorytu NWA 6410

| etap | zmiana masy | | | |
|------|--------------------|-------|--------------------|--------|
| | <100 μm | | >100 μm | |
| | g | % | g | % |
| II | 36,1 | 27,98 | -35,3 | -39,89 |
| III | 18,9 | 11,45 | -18,8 | -35,34 |
| IV | 9,0 | 4,89 | -9,2 | -26,74 |
| V | 3,2 | 1,66 | -3,4 | -13,49 |
| VI | 2,1 | 1,07 | -2,2 | -10,09 |
| VII | 3,1 | 1,56 | -3,2 | -16,33 |
| VIII | 1,1 | 0,55 | -1,0 | -6,10 |

Próbki frakcji 0-100 μm oraz 100-500 μm zostały skierowane do analizy QEMScan w celu oceny wzbogacenia w minerały stopu FeNi. Próbka frakcji powyżej 500 μm , z uwagi na brak możliwości analogicznej analizy została poddana analizie mikroskopowej przy wykorzystaniu mikroskopu stereoskopowego. Na rysunku 8.67 przedstawiono wykonane zdjęcia ziaren frakcji powyżej 500 μm . Ziarna te są oblepione silnie przylegającym, bardzo drobnym materiałem frakcji pylastej, w którego skład wchodzi prawdopodobnie głównie krzemiany i w mniejszej ilości troilit. Po oczyszczeniu części ziaren frakcji powyżej 500 μm zaobserwowano, że są to ziarna stopu FeNi. Widoczne są także oznaki utleniania żelaza na powierzchni tych ziaren. Nie zaobserwowano występowania troilitu, jednak z uwagi na obserwowane podczas badań mikroskopowych wrostki siarczku żelaza w stopie FeNi, prawdopodobnie troilit występuje również w tych ziarnach w niewielkiej ilości. Poczynione obserwacje pozwalają na stwierdzenie, że co najmniej 95% masy frakcji powyżej 500 μm stanowi stop FeNi i należałoby go potraktować wspólnie z frakcją powyżej 100 μm jako jeden produkt. Z uwagi jednak na brak dokładnych danych dotyczących składu mineralnego oraz chemicznego tej frakcji rozważania te zostały opisane w osobnym punkcie.



Rysunek 8.67. Ziarna frakcji o średnicy powyżej 500 μm z meteorytu NWA 6410. W górnym lewym rogu ziarna po analizie sitowej, pozostałe ziarna oczyszczone z pyłu. Widoczne silnie odbijające światło powierzchnie to powierzchnie ziaren FeNi, natomiast lekko żółtawe powierzchnie stanowią niezidentyfikowane związki chemicznie utlenionego żelaza lub niezidentyfikowane minerały wchodzące w skład frakcji pyłastej

8.4. Kruszenie oraz mielenie rudy chondrytowej jako proces wzbogacania

8.4.1. Tamdakht

W tabeli 8.18 przedstawiono wyniki analizy mineralnej meteorytu Tamdakht metodą QEMScan. Analizując te wyniki można stwierdzić, że procesy rozdrabniania rudy chondrytowej są jednocześnie procesami wzbogacania. W tym kontekście za koncentrat należy uznać frakcję o wielkości ziaren powyżej 100 μm , natomiast za odpad frakcję poniżej 100 μm . W odpadzie znalazło się 99,19% troilitu (składnik niepożądany z uwagi na pogorszenie jakości stali w procesach hutniczych), 97,74% krzemianów i glinokrzemianów (minerały skały płonnej), a także 95,66% fosforanów oraz 96,94% chromitu, które mogą być rozważane również jako minerały do późniejszego odzysku. 65,68% minerałów stopu FeNi znalazło się w koncentracie. W koncentracie w dalszym ciągu znajdują się minerały niepożądane: 10,46% koncentratu to krzemiany i glinokrzemiany, natomiast 0,24% to troilit.

Tabela 8.18. Wyniki analizy mineralnej chondrytu Tamdakht po rozdrobieniu

| faza mineralna | zawartość % | | | uzysk % | | |
|----------------|-------------|-------|----------|---------|-------|----------|
| | <100 | >100 | Tamdakht | <100 | >100 | Tamdakht |
| krzemiany | 84,53 | 10,46 | 72,89 | 97,74 | 2,26 | 100,00 |
| troilit | 5,46 | 0,24 | 4,64 | 99,18 | 0,82 | 100,00 |
| fosforany | 0,37 | 0,09 | 0,33 | 95,66 | 4,34 | 100,00 |
| chromit | 0,71 | 0,12 | 0,62 | 96,94 | 3,06 | 100,00 |
| stop FeNi | 8,60 | 88,24 | 21,12 | 34,42 | 65,68 | 100,00 |
| inne | 0,33 | 0,85 | 0,41 | 67,55 | 32,45 | 100,00 |

W tabeli 8.19 oraz 8.20 przedstawiono bilanse separacji poprzez proces rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje ziarnowe, gdzie koncentratem jest frakcja powyżej 100 μm , natomiast odpadem jest frakcja poniżej 100 μm . Bilanse przedstawiono dla stopu FeNi oraz troilitu (FeS). Na podstawie bilansów stwierdzić należy, że w przypadku stopu FeNi proces wzbogacania był bardzo wydajny. Współczynnik wzbogacania k jest równy 4,17. W przypadku troilitu w koncentracie zaszedł proces zubażania. Współczynnik wzbogacania k jest równy 0,05.

Tabela 8.19. Bilans separacji stopu FeNi na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 40,31 | 15,78 | 88,24 | 4,17 | 65,78 |
| Odpad | 215,17 | 84,22 | 8,6 | 0,41 | 34,22 |
| Nadawa | 255,48 | 100,00 | 21,17 | 1 | 100,00 |

Tabela 8.20. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 40,31 | 15,78 | 0,24 | 0,05 | 0,82 |
| Odpad | 215,17 | 84,22 | 5,46 | 1,18 | 99,18 |
| Nadawa | 255,48 | 100,00 | 4,64 | 1 | 100,00 |

W tabeli 8.21 przedstawiono wyniki analizy mineralnej chondrytu Tamdakht uwzględniającej w bilansie frakcję powyżej 500 μm . Z uwagi na brak przeprowadzonych szczegółowych analiz mineralnych i chemicznych tej frakcji, przyjęto na podstawie obserwacji mikroskopowych, że około 95% masy stanowi stop FeNi, 4,7% krzemiany oraz 0,3% troilit. Przedstawione dane uwzględniające frakcję powyżej 500 μm wskazują na jeszcze wyższą jakość uzyskanego koncentratu stopu FeNi na drodze rozdrabniania i separacji skały rudnej. Zawartość stopu FeNi we frakcji powyżej 100 μm wzrosła z 88,24 do 89,44%, natomiast uzysk stopu FeNi wzrósł z 65,68 do 70,30%. Jednocześnie zawartość FeS nieznacznie wzrosła z 0,24% do 0,25%, natomiast uzysk troilitu w koncentracie wzrósł z 0,81 do 1,03%.

Tabela 6.21. Wyniki analizy mineralnej chondrytu Tamdakht po rozdrobieniu, obejmujące również frakcję powyżej 500 μm

| faza mineralna | zawartość % | | | uzysk % | | |
|----------------|-------------|-------|----------|---------|-------|----------|
| | <100 | >100* | Tamdakht | <100 | >100* | Tamdakht |
| krzemiany | 84,53 | 9,44 | 70,61 | 97,52 | 2,48 | 100,00 |
| troilit | 5,46 | 0,25 | 4,49 | 98,97 | 1,03 | 100,00 |
| fosforany | 0,37 | 0,07 | 0,32 | 95,64 | 4,36 | 100,00 |
| chromit | 0,71 | 0,10 | 0,60 | 96,93 | 3,07 | 100,00 |
| stop FeNi | 8,60 | 89,44 | 23,59 | 29,70 | 70,30 | 100,00 |
| inne | 0,33 | 0,70 | 0,40 | 67,45 | 32,55 | 100,00 |

W tabeli 8.22 oraz 8.23 przedstawiono bilanse separacji poprzez proces rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje ziarnowe, gdzie koncentratem jest frakcja powyżej 100 μm (włączając w to frakcję powyżej 500 μm), natomiast odpadem jest frakcja poniżej 100 μm . Bilanse przedstawiono dla stopu FeNi oraz troilitu (FeS). Na podstawie bilansów stwierdzić należy, że w przypadku stopu FeNi proces wzbogacania był bardzo wydajny. Współczynnik wzbogacania k jest równy 3,79, przy jednoczesnej wartości współczynnika wzbogacania (zubożenia) w odpadzie równym 0,36. Dla troilitu współczynnik wzbogacania (zubożenia) równy jest 0,06.

Tabela 8.22. Bilans separacji stopu FeNi na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 48,97 | 18,52 | 89,44 | 3,79 | 70,30 |
| Odpad | 215,17 | 81,46 | 8,6 | 0,36 | 29,70 |
| Nadawa | 255,48 | 100,00 | 23,59 | 1 | 100,00 |

Tabela 8.23. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 48,97 | 18,52 | 0,25 | 0,06 | 1,03 |
| Odpad | 215,17 | 81,46 | 5,46 | 1,21 | 98,97 |
| Nadawa | 255,48 | 100,00 | 4,49 | 1 | 100,00 |

W tabeli 8.24 przedstawiono wyniki analizy składu ziarnowego wykonanej przy okazji analiz QEMScan. Z danych tych wynika, że rozdział frakcji nie odbył się z pełną skutecznością. We frakcji ziaren o średnicy poniżej 100 μm ziarna o średnicy większej stanowiły 1,59% masy. We frakcji ziaren o średnicy powyżej 100 μm , ziarna mniejsze stanowiły aż 26,94% masy. Jest to sytuacja normalna. Najmniejsze ziarna były związane z większymi dzięki sile kohezji. Ich rozdzielanie wymaga użycia analizy sitowej „na mokro”.

Tabela 8.24. Analiza składu ziarnowego poszczególnych frakcji meteorytu Tamdakht po rozdrobieniu

| Oznaczenie | Frakcja % | | | | | |
|------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| | < 20 μm | 20-40 μm | 40-71 μm | 71-100 μm | 100-200 μm | >200 μm |
| <100 | 42,78 | 24,64 | 21,90 | 9,09 | 1,59 | 0,00 |
| >100 | 4,06 | 2,89 | 7,30 | 12,69 | 51,25 | 21,81 |
| Próbka | 36,69 | 21,22 | 19,60 | 9,66 | 9,40 | 3,43 |

W tabelach 8.25 oraz 8.26 przedstawiono dane dotyczące asocjacji faz mineralnych dla badanych frakcji. W tabeli 8.25 przedstawiono dane dla frakcji poniżej 100 μm , która zgodnie z dotychczasowymi wynikami badań stanowi odpad. Na podstawie analizy uzyskanych wyników zaobserwowano, że troilit został uwolniony dość dobrze – uwolniono 71,10% jego powierzchni. Oznacza to, że istnieje możliwość usunięcia tej fazy mineralnej z frakcji poniżej 100 μm na drodze flotacji. 7,34% powierzchni troilitu jest związana z minerałami stopu FeNi, natomiast 19,32% powierzchni ziaren FeS związanych jest z krzemianami i glinokrzemianami. Minerale stopu FeNi także zostały dość dobrze uwolnione (64,07% powierzchni uwolnionych). 10,06% powierzchni stopu FeNi związane jest z troilem. Ponadto 24,04% powierzchni związana jest z krzemianami i glinokrzemianami. We frakcji poniżej 100 μm znalazły się także fosforany oraz chromit, mogące mieć znaczenie gospodarcze (złożowe i górnicze). Fosforany zostały uwolnione w 41,47%, natomiast w 47,47% tworzą asocjacje z minerałami z kategorii inne. Chromit został uwolniony w 51,44%, a w 37,07% tworzy asocjacje z krzemianami i glinokrzemianami. Daje to podstawę do rozważania możliwości pozyskania tych minerałów na drodze procesów mineralurgicznych.

Tabela 8.25. Asocjacje dla frakcji poniżej 100 μm (Tamdakht)

| | Krzemiany i glinokrzemiany | Troilit | Fosforany | Chromit | Stop FeNi | Inne | Tłó |
|----------------------------|----------------------------|---------|-----------|---------|-----------|--------|--------|
| Krzemiany i glinokrzemiany | 0,00 | 19,32 | 9,23 | 37,07 | 24,04 | 12,07 | 77,65 |
| Troilit | 1,37 | 0,00 | 0,99 | 1,13 | 10,06 | 0,68 | 4,14 |
| Fosforany | 0,04 | 0,07 | 0,00 | 0,25 | 0,03 | 1,05 | 0,16 |
| Chromit | 0,34 | 0,14 | 0,48 | 0,00 | 0,17 | 0,39 | 0,39 |
| Stop FeNi | 1,24 | 7,34 | 0,35 | 0,98 | 0,00 | 0,39 | 2,72 |
| Inne | 2,57 | 2,03 | 47,47 | 9,14 | 1,62 | 0,00 | 14,94 |
| Tłó | 94,44 | 71,10 | 41,47 | 51,44 | 64,07 | 85,41 | 0,00 |
| SUMA | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Inaczej sytuacja przedstawia się we frakcji powyżej 100 μm . We frakcji tej uwolniono 29,46% powierzchni troilitu, natomiast 51,37% występuje w asocjacji ze stopem FeNi. W przypadku faz mineralnych stopu FeNi, uwolnionych jest 57,84% powierzchni, a 1,41% powierzchni tworzy asocjacje z troilem. Podane dane wraz z doświadczeniem płynącym z analiz mikroskopowych ziaren troilitu oraz stopu FeNi wskazują na to, że troilit ten występuje w ziarnach FeNi jako małe ziarna admieszane ze stopu. Oznacza to, że usunięcie ich w drodze procesów mineralurgicznych jest mało prawdopodobne.

Tabela 8.26. Asocjacje dla frakcji powyżej 100 µm (Tamdakht)

| | Krzemiany i glinokrzemiany | Troilit | Fosforany | Chromit | Stop FeNi | Inne | Tłó |
|-------------------------------|-------------------------------|---------|-----------|---------|--------------|--------|--------|
| Krzemiany i glinokrzemiany | 0,00 | 16,83 | 100,00 | 21,52 | 37,07 | 9,74 | 40,60 |
| Troilit | 0,43 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 1,41 | 0,14 | 0,51 |
| Fosforany | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Chromit | 0,17 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,30 | 0,38 | 0,12 |
| Stop FeNi | 34,76 | 51,37 | 0,00 | 36,28 | 0,00 | 7,74 | 36,31 |
| Inne | 3,99 | 2,30 | 0,00 | 19,92 | 3,38 | 0,00 | 22,46 |
| Tłó | 60,65 | 29,46 | 0,00 | 22,16 | 57,84 | 82,00 | 0,00 |
| SUMA | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

8.4.2. NWA 6410

W tabeli 8.27 przedstawiono wyniki analizy składu mineralnego meteorytu NWA 6410 metodą QEMScan. Analizując te wyniki można dojść do zupełnie innych wniosków niż w przypadku meteorytu Tamdakht. Procesy rozdrabniania rudy chondrytowej w przypadku meteorytu NWA 6410 są mniej selektywne niż w przypadku chondrytu Tamdakht. Frakcja o wielkości ziaren powyżej 100 µm w dalszym ciągu wykazuje pewne wzbogacenie w minerały stopu FeNi, jednak wyniki nie są tak dobre jak w przypadku chondrytu Tamdakht. We frakcji powyżej 100 µm minerały stopu FeNi wzbogaciły się nieznacznie (zawartość 37,66%, uzysk 22,06%). Dodatkowo zawartość troilitu we frakcji powyżej 100 µm wynosi powyżej 1%. We frakcji poniżej 100 µm uzysk troilitu wyniósł 98,94%. Na taki wynik duży wpływ mogła mieć duża porowatość minerałów fazy FeNi, mogąca ułatwiać procesy rozdrabniania, a także stosunkowo duża zawartość siarczku. Ponadto część ziaren stopu FeNi pozostało we frakcji powyżej 500 µm (2,2 g, co stanowi 12,5% całkowitej masy frakcji powyżej 100 µm, oraz 1% całkowitej masy badanej próbki).

Tabela 8.27. Wyniki analizy składu mineralnego chondrytu NWA 6410 po rozdrobnieniu

| faza mineralna | zawartość % | | | uzysk % | | |
|-------------------|----------------|-------|-------------|------------|-------|-------------|
| | <100 | >100 | NWA 6410 | <100 | >100 | NWA 6410 |
| krzemiany | 80,07 | 60,12 | 78,66 | 94,60 | 5,40 | 100,00 |
| troilit | 7,46 | 1,06 | 7,01 | 98,94 | 1,06 | 100,00 |
| fosforany | 0,37 | 0,03 | 0,34 | 99,30 | 0,70 | 100,00 |
| chromit | 0,84 | 0,38 | 0,81 | 96,73 | 3,27 | 100,00 |
| stop FeNi | 10,12 | 37,66 | 12,06 | 77,94 | 22,06 | 100,00 |
| inne | 1,14 | 0,76 | 1,11 | 95,17 | 4,83 | 100,00 |

W tabeli 8.28 oraz 8.29 przedstawiono bilanse separacji poprzez proces rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje ziarnowe, gdzie koncentratem jest frakcja powyżej 100 µm, natomiast odpadem jest frakcja poniżej 100 µm. Bilanse przedstawiono dla stopu FeNi oraz troilitu (FeS). Na podstawie bilansów stwierdzić należy, że w przypadku stopu FeNi proces wzbogacania był bardzo wydajny. Współczynnik wzbogacania k jest równy 3,12. W przypadku troilitu w koncentracie zaszedł proces zubażania. Współczynnik wzbogacania k jest równy 0,15.

Tabela 8.28. Bilans separacji stopu FeNi na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu NWA 6410

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 15,40 | 7,07 | 37,66 | 3,12 | 22,06 |
| Odpad | 202,50 | 92,93 | 10,12 | 0,84 | 77,94 |
| Nadawa | 217,90 | 100,00 | 12,07 | 1 | 100,00 |

Tabela 8.29. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu NWA 6410

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 15,40 | 7,07 | 1,06 | 0,15 | 1,07 |
| Odpad | 202,50 | 92,93 | 7,46 | 1,06 | 98,93 |
| Nadawa | 217,90 | 100,00 | 7,01 | 1 | 100,00 |

W tabeli 8.30 przedstawiono wyniki analizy mineralnej chondrytu NWA 6410 uwzględniającej w bilansie frakcję powyżej 500 μm . Z uwagi na brak przeprowadzonych szczegółowych analiz mineralnych i chemicznych tej frakcji, przyjęto na podstawie obserwacji mikroskopowych, że około 95% masy stanowi stop FeNi, 4,6% krzemiany oraz 0,4% troilit. Przedstawione dane uwzględniające frakcję powyżej 500 μm wskazują na wyższą jakość uzyskanego koncentratu stopu FeNi na drodze rozdrabniania i separacji skały rudnej. Zawartość stopu FeNi we frakcji powyżej 100 μm wzrosła z 37,66 do 44,83%, natomiast uzysk stopu FeNi wzrósł z 22,06 do 27,80%. Jednocześnie zawartość FeS zmalała z 1,06% do 0,98%, natomiast uzysk troilitu w koncentracie nieznacznie wzrósł z 1,06 do 1,13%.

Tabela 8.30. Wyniki analizy mineralnej chondrytu NWA 6410 po rozdrobieniu, obejmujące również frakcję powyżej 500 μm

| faza mineralna | zawartość % | | | uzysk % | | |
|-------------------|----------------|-------|-------------|------------|-------|-------------|
| | <100 | >100* | NWA 6410 | <100 | >100* | NWA 6410 |
| krzemiany | 80,07 | 53,18 | 77,92 | 94,54 | 5,46 | 100,00 |
| troilit | 7,46 | 0,98 | 6,94 | 98,87 | 1,13 | 100,00 |
| fosforany | 0,37 | 0,03 | 0,34 | 99,39 | 0,61 | 100,00 |
| chromit | 0,84 | 0,33 | 0,80 | 96,67 | 3,33 | 100,00 |
| stop FeNi | 10,12 | 44,83 | 12,90 | 72,20 | 27,80 | 100,00 |
| inne | 1,14 | 0,67 | 1,10 | 95,17 | 4,83 | 100,00 |

W tabeli 8.31 oraz 8.32 przedstawiono bilanse separacji poprzez proces rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje ziarnowe, gdzie koncentratem jest frakcja powyżej 100 μm (włączając w to frakcję powyżej 500 μm), natomiast odpadem jest frakcja poniżej 100 μm . Bilanse przedstawiono dla stopu FeNi oraz troilitu (FeS). Na podstawie bilansów stwierdzić należy, że w przypadku stopu FeNi proces wzbogacania był bardzo wydajny. Współczynnik wzbogacania k jest równy 3,48, przy jednoczesnej wartości współczynnika wzbogacania (zubażania) w odpadzie równym 0,78. Dla troilitu współczynnik wzbogacania (zubażania) równy jest 0,14.

Tabela 8.31. Bilans separacji stopu FeNi na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu NWA 6410

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 17,60 | 8,00 | 44,83 | 3,48 | 27,80 |
| Odpad | 202,50 | 92,00 | 10,12 | 0,78 | 72,20 |
| Nadawa | 220,10 | 100,00 | 12,90 | 1 | 100,00 |

Tabela 1.32. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze rozdrabniania i rozdziału nadawy na frakcje dla meteorytu NWA 6410

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 17,60 | 8,00 | 0,98 | 0,14 | 1,13 |
| Odpad | 202,50 | 92,00 | 7,46 | 1,07 | 98,87 |
| Nadawa | 220,10 | 100,00 | 6,94 | 1 | 100,00 |

W tabeli 8.33 przedstawiono wyniki analizy składu ziarnowego wykonanej przy okazji analiz QEMScan. Z danych tych wynika, że rozdział frakcji nie odbył się z pełną skutecznością. We frakcji ziaren o średnicy poniżej 100 μm ziarna o średnicy większej stanowiły 3,98% masy. We frakcji ziaren o średnicy powyżej 100 μm , ziarna mniejsze stanowiły aż 47,52% masy. Jest to sytuacja normalna. Najmniejsze ziarna były związane z większymi dzięki sile kohezji. Ich rozdzielanie wymaga użycia analizy sitowej „na mokro”.

Tabela 8.33. Analiza składu ziarnowego poszczególnych frakcji meteorytu NWA 6410 po rozdrobnieniu

| Oznaczenie | Frakcja % | | | | | |
|------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| | < 20 μm | 20-40 μm | 40-71 μm | 71-100 μm | 100-200 μm | >200 μm |
| <100 | 32,38 | 24,42 | 25,45 | 13,78 | 3,98 | 0,00 |
| >100 | 3,00 | 4,64 | 12,65 | 27,23 | 44,35 | 8,12 |
| Próbka | 30,30 | 23,02 | 24,55 | 14,73 | 6,83 | 0,57 |

W tabelach 8.34 oraz 8.35 przedstawiono dane dotyczące asocjacji faz mineralnych dla badanych frakcji. W tabeli 8.34 przedstawiono dane dla frakcji poniżej 100 μm , która zgodnie z dotychczasowymi wynikami badań stanowiła odpad. Z zawartości faz mineralnych interesujących ze złożowego i ekonomicznego punktu widzenia wynika, że troilit został uwolniony bardzo dobrze – uwolniono 81,08% jego powierzchni. Oznacza to, że istnieje możliwość usunięcia tej fazy mineralnej z frakcji poniżej 100 μm na drodze flotacji, co biorąc pod uwagę wyniki wzbogacenia poprzez procesy rozdrabniania jest konieczne. Jedyne 0,68% powierzchni troilitu jest związana z minerałami stopu FeNi, natomiast 7,65% powierzchni ziaren FeS związanych jest z krzemianami i glinokrzemianami. Minerale stopu FeNi także zostały słabo uwolnione (43,71% powierzchni uwolnionych). 3,52% powierzchni stopu FeNi związane jest z troilem. Ponadto 18,30% powierzchni związane jest z krzemianami i glinokrzemianami. We frakcji poniżej 100 μm znalazły się także fosforany oraz chromit, mogące mieć znaczenie górnicze. Fosforany zostały uwolnione w 78,20%, natomiast w 15,22% tworzą asocjacje z krzemianami i glinokrzemianami. Chromit został uwolniony w 62,70%, a w 22,12% tworzy asocjacje z krzemianami i glinokrzemianami. Daje to podstawę do rozważania możliwości pozyskania tych minerałów na drodze procesów mineralurgicznych.

Tabela 8.34. Asocjacje mineralne dla frakcji poniżej 100 µm (NWA 6410)

| | Krzemiany i glinokrzemiany | Troilit | Fosforany | Chromit | Stop FeNi | Inne | Tłó |
|-------------------------------|-------------------------------|---------|-----------|---------|--------------|--------|--------|
| Krzemiany i glinokrzemiany | 0,00 | 7,65 | 15,22 | 22,12 | 18,30 | 41,71 | 74,29 |
| Troilit | 0,52 | 0,00 | 0,53 | 0,87 | 3,52 | 1,77 | 4,13 |
| Fosforany | 0,12 | 0,07 | 0,00 | 0,12 | 0,10 | 0,11 | 0,56 |
| Chromit | 0,29 | 0,16 | 0,20 | 0,00 | 0,17 | 0,45 | 0,74 |
| Stop FeNi | 0,38 | 0,68 | 0,25 | 0,26 | 0,00 | 1,67 | 0,72 |
| Inne | 17,00 | 10,36 | 5,60 | 13,93 | 34,20 | 0,00 | 19,56 |
| Tłó | 81,69 | 81,08 | 78,20 | 62,70 | 43,71 | 54,29 | 0,00 |
| SUMA | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Inaczej sytuacja przedstawia się we frakcji powyżej 100 µm. We frakcji tej uwolniono 29,46% powierzchni troilitu, natomiast jedynie 15,20% występuje w asocjacji ze stopem FeNi. W przypadku faz stopu FeNi, uwolnionych jest jedynie 35,97% powierzchni, a 2,17% powierzchni tworzy asocjacje z troilitem. Niski poziom uwolnienia ziaren we frakcji powyżej 100 µm znacznie utrudnia prowadzenie procesów przerobczych tej właśnie fazy.

Tabela 8.35. Asocjacje dla frakcji powyżej 100 µm (NWA 6410)

| | Krzemiany i glinokrzemiany | Troilit | Fosforany | Chromit | Stop FeNi | Inne | Tłó |
|-------------------------------|-------------------------------|---------|-----------|---------|--------------|--------|--------|
| Krzemiany i glinokrzemiany | 0,00 | 26,98 | 50,64 | 46,98 | 8,20 | 52,64 | 67,42 |
| Troilit | 0,77 | 0,00 | 1,04 | 0,55 | 2,17 | 1,15 | 0,94 |
| Fosforany | 0,15 | 0,11 | 0,00 | 0,14 | 0,03 | 0,08 | 0,09 |
| Chromit | 0,74 | 0,31 | 0,75 | 0,00 | 0,09 | 0,66 | 0,40 |
| Stop FeNi | 1,63 | 15,20 | 1,74 | 1,17 | 0,00 | 15,43 | 7,99 |
| Inne | 36,34 | 27,95 | 19,84 | 28,71 | 53,53 | 0,00 | 23,17 |
| Tłó | 60,37 | 29,46 | 25,99 | 22,44 | 35,97 | 30,04 | 0,00 |
| SUMA | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Z powyżej przedstawionych rezultatów wynika wprost, że kruszenie, mielenie oraz odsiew ziaren poniżej 100 µm może być, ale nie musi, wystarczającym sposobem wzbogacania rudy typu chondrytowego. Próba uzyskania żelaza oraz niklu z frakcji poniżej 100 µm jest potencjalnie nieopłacalna, jednak nie zawsze jest możliwość uzyskania dobrego koncentratu stopu FeNi we frakcji powyżej 100 µm. Ponadto we frakcji poniżej 100 µm znajdują się ziarna chromitu czy apatytu, które również są potencjalnymi minerałami rudnymi.

8.5. Separacja magnetyczna

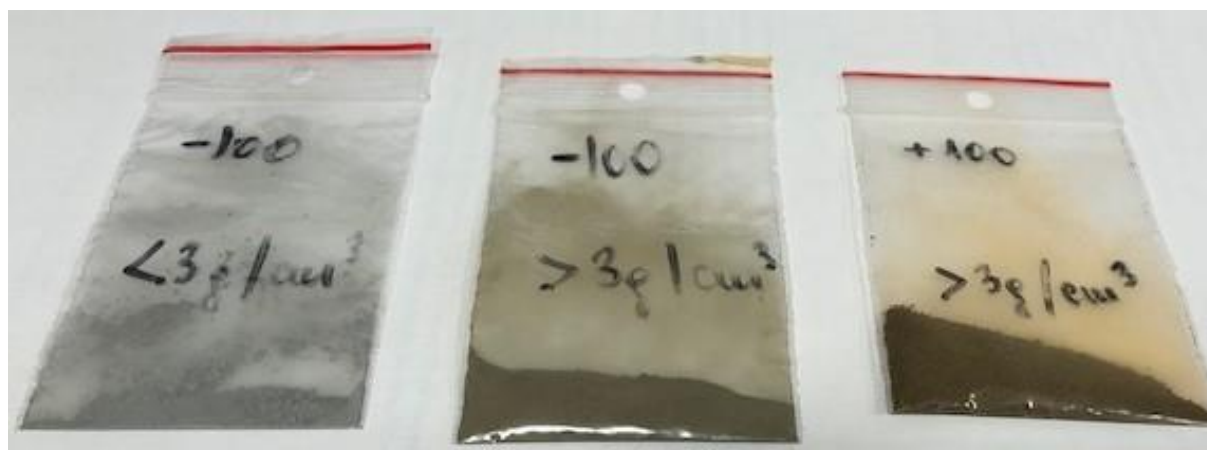
Próba separacji magnetycznej ziaren FeNi skończyła się, zgodnie z przypuszczeniami, niepowodzeniem. Celem testu było rozdzielenie frakcji magnetycznej, zawierającej ziarna stopu FeNi, oraz frakcji niemagnetycznej, wśród której powinny znaleźć się ziarna troilitu. Rozdział się nie powiódł z uwagi na obecność małych ziaren stopu FeNi zawartych w większych kryształach i agregatach mineralnych krzemianów. Ponadto niemagnetyczne zarówno krzemiany jak i troilit występują w zrostach z minerałami magnetycznego stopu FeNi. Obecność tych ziaren i zrostów powodowała, że cały kryształ krzemianu lub agregat złożony z kilku kryształów krzemianów zachowywał się jakby był podatny magnetycznie, co uniemożliwiło wykonanie efektywnego procesu separacji.

8.6. Separacja w cieczy ciężkiej

Próba separacji nadawy w cieczy ciężkiej również skończyła się niepowodzeniem. Separacja ta opierała się na rozdziale ziaren z uwagi na ich gęstość. W przypadku separacji frakcji o średnicy ziaren poniżej 100 μm udało się wydzielić 0,2 g (0,8%) frakcji krzemianowej o gęstości ziaren poniżej 3 g/cm^3 , charakteryzującą się ciemnoszarą barwą oraz frakcję ziaren o gęstości powyżej 3 g/cm^3 o barwie szarobrunatnej (99,2%) (rysunek 8.68). W przypadku frakcji ziaren o średnicy powyżej 100 μm , będącej docelowym przedmiotem wzbogacania, nie wydzielono frakcji o gęstości poniżej 3 g/cm^3 (tabela 8.36).

Tabela 8.36. Wychody poszczególnych frakcji po separacji w cieczy ciężkiej chondrytu Tamdakht

| Frakcja | Gęstość | Wychód, g | Wychód, % |
|---------|----------------------------|-----------|-----------|
| >100 | > 3 g/cm^3 | 8,8 | 100,0 |
| | < 3 g/cm^3 | 0,0 | 0,0 |
| <100 | > 3 g/cm^3 | 25,0 | 99,2 |
| | < 3 g/cm^3 | 0,2 | 0,8 |



Rysunek 8.68. Produkty uzyskane w wyniku separacji w cieczy ciężkiej rudy z meteorytu Tamdakht

Zgodnie z informacją zawartą w specyfikacji cieczy ciężkiej, powodem niepowodzenia próby możliwa była reakcja z troilitem (ostrzeżenie przed użyciem cieczy ciężkiej ze związkami siarki), lub stopem FeNi, który w reakcji mógł być reduktorem. Prócz uzyskanego koncentratu oraz odpadu otrzymano dwa roztwory o barwie ciemnofioletowej (rysunek 8.69). W przypadku roztworu uzyskanego po separacji frakcji poniżej 100 μm , jego barwa uległa całkowitemu odbarwieniu w ciągu kilku godzin i stała się przezroczysta. W roztworze po separacji frakcji powyżej 100 μm fioletowa barwa utrzymywała się przez kilka dni. Barwa powoli jaśniała i zmieniała się stopniowo od góry butelki do jej dołu. Szybszy zanik barwy w frakcji poniżej 100 μm (barwa zniknęła po około godzinie, względem kilku dni przy frakcji powyżej 100 μm) można wyjaśnić szybszym zakończeniem reakcji z uwagi na większe rozdrobnienie reagentów (i tym samym zwiększenie powierzchni reakcji), natomiast charakterystyczny sposób zmiany barwy może wskazywać na utlenienie produktu tej reakcji tlenem atmosferycznym. Być może istnieje wciąż możliwość regeneracji tej cieczy ciężkiej.



Rysunek 8.69. Roztwory cieczy ciężkiej po przeprowadzeniu separacji rudy chondrytowej

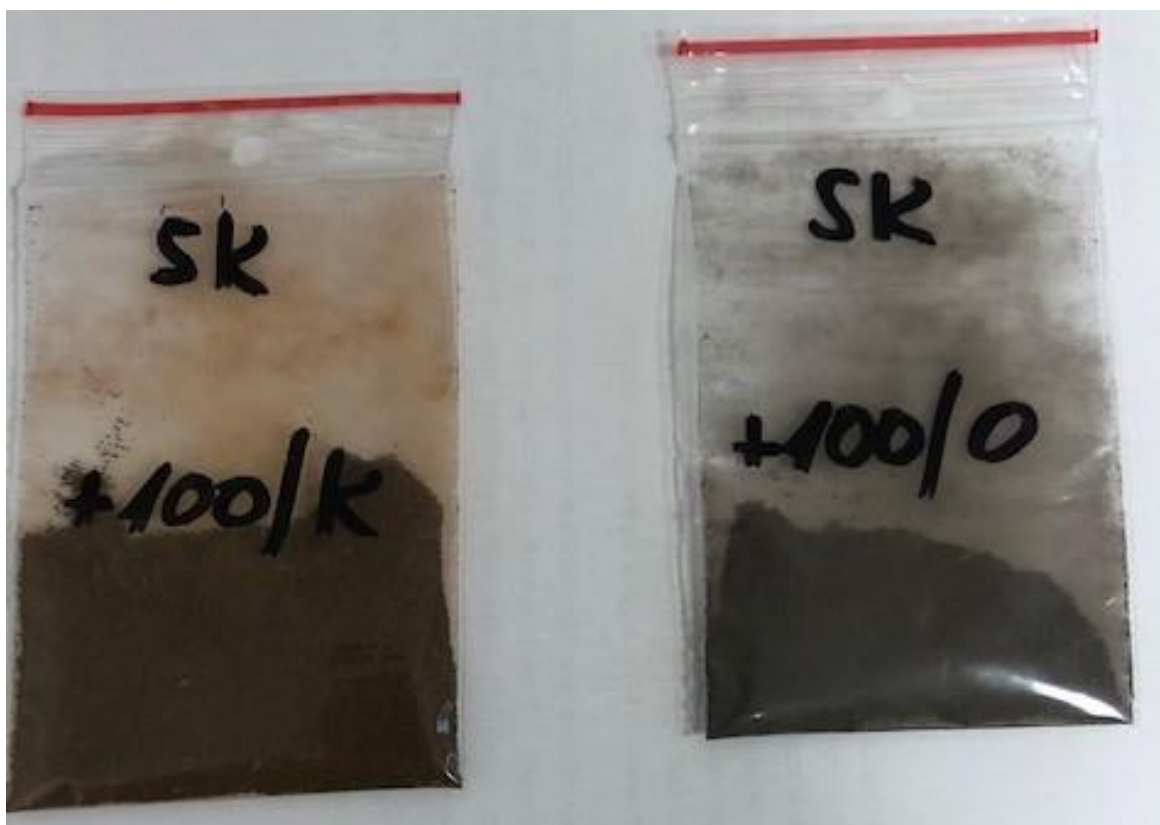
8.7. Separacja na stole koncentracyjnym

Separacja na stole koncentracyjnym powiodła się. Podczas separacji frakcji o średnicy ziaren poniżej $100\ \mu\text{m}$ otrzymano koncentrat o barwie szarej z odcieniem brązowym oraz odpad o barwie szarej (rysunek 8.70). Sama barwa wraz z ilością obydwu produktów separacji świadczą o niskiej efektywności tego procesu. Próbki te nie zostały poddane dalszej analizie.



Rysunek 8.70. Produkty separacji na stole koncentracyjnym nadawy o frakcji poniżej 100 μm

W wyniku separacji na stole koncentracyjnym frakcji o średnicy ziaren powyżej 100 μm również otrzymano dwa produkty. Koncentrat ma wyraźnie bardziej brunatną barwę, świadcząca o obecności tlenku żelaza, natomiast odpad jest bardziej szary (rysunek 8.71). Może wskazywać to na dość dobrą separację nadawy. Próbkę te zostały skierowane do dalszej analizy.



Rysunek 8.71. Produkty separacji na stole koncentracyjnym nadawy o frakcji poniżej 100 μm

Wychody produktów separacji na stole koncentracyjnym przedstawiono w tabeli 8.37.

Tabela 8.37. Wychody poszczególnych frakcji po separacji na stole koncentracyjnym chondrytu Tamdakht

| Frakcja | Produkt separacji | Wychód, g | Wychód, % |
|--------------------|-------------------|-----------|-----------|
| >100 μm | koncentrat | 18,2 | 69,2 |
| | odpad | 8,1 | 30,8 |
| <100 μm | koncentrat | 61,1 | 56,6 |
| | odpad | 46,9 | 43,4 |

W tabeli 8.38 przedstawiono wyniki analizy QEMScan produktów separacji na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 μm . Ten typ separacji jest mało efektywny. Chromit i oliwin praktycznie nie podlegają separacji (trafiają w równej ilości do produktów). Zarówno troilit jak i stop FeNi koncentrują się w tym samym produkcie niemalże w równym stopniu (uzysk troilitu – 76,25%, uzysk minerałów stopu FeNi – 70,74%). Pod względem zawartości troilitu najlepszym produktem jest odpad (zawartość 0,14% wobec oczekiwanego 0,1%).

Tabela 8.38. Wyniki analizy składu mineralnego chondrytu Tamdakht po separacji na stole koncentracyjnym

| Faza mineralna | zawartość % | | | uzysk % | | |
|----------------|-------------|-------|----------|------------|-------|----------|
| | Koncentrat | Odpad | Tamdakht | Koncentrat | odpad | Tamdakht |
| oliwin | 4,04 | 7,43 | 5,11 | 54,25 | 45,75 | 100,00 |
| troilit | 0,20 | 0,14 | 0,18 | 76,25 | 23,75 | 100,00 |
| chromit | 0,04 | 0,08 | 0,05 | 52,16 | 47,84 | 100,00 |
| stop FeNi | 82,59 | 76,76 | 80,79 | 70,74 | 29,26 | 100,00 |

W tabeli 8.39 oraz 8.40 przedstawiono bilanse separacji na stole koncentracyjnym dla stopu FeNi oraz troilitu (FeS). Na podstawie bilansów stwierdzić należy, że w przypadku stopu FeNi proces wzbogacania praktycznie nie zaszedł. Współczynnik wzbogacania k jest równy 1,02. Dla troilitu współczynnik wzbogacania równy jest 1,10 jednak jest to wielkość nieznacznie lepsza niż dla stopu FeNi.

Tabela 8.32. Bilans separacji stopu FeNi na stole koncentracyjnym dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 18,2 | 69,2 | 82,59 | 1,02 | 70,74 |
| Odpad | 8,1 | 30,8 | 76,76 | 0,95 | 29,26 |
| Nadawa | 26,3 | 100,0 | 80,79 | 1 | 100,00 |

Tabela 8.40. Bilans separacji troilitu (FeS) na stole koncentracyjnym dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 18,2 | 69,2 | 0,20 | 1,10 | 76,25 |
| Odpad | 8,1 | 30,8 | 0,14 | 0,77 | 23,75 |
| Nadawa | 26,3 | 100,0 | 0,18 | 1 | 100,00 |

Separacja na stole koncentracyjnym nie jest dobrą metodą wzbogacania rudy chondrytowej o frakcji powyżej 100 μm . Z tego powodu metoda ta nie była rozważana przy wzbogacaniu rudy chondrytowej pochodzącej z chondrytów grupy L.

8.8. Flotacja

8.8.1. Tamdakht

Dla meteorytu Tamdakht, frakcji poniżej 100 μm , wykonano dwa testy flotacyjne. Pierwszy z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego (F1), natomiast druga z wykorzystaniem zbieracza aminowego (F2). W tabeli 8.41 przedstawiono wyniki analizy QEMScan produktów flotacji. W przypadku zastosowania zbieracza ksantogenianowego (flotacja F1) możliwy był bardzo dobry rozdział ziaren troilitu. W koncentracie znalazło się 98,39% troilitu. Uzyskany odpad zawierał jedynie 0,13% troilitu (wobec wymaganych 0,1%). Pozostałe składniki koncentrowały się przede wszystkim w odpadzie. Uzysk stopu FeNi w odpadzie wyniósł 79,31%, natomiast zawartość tego składnika w odpadzie to 7,25%. Przy flotacji z udziałem zbieracza aminowego (flotacja F2) nastąpiła koncentracja stopu FeNi w odpadzie (uzysk 83,94%, zawartość składnika 14,03%) przy jednoczesnym pogorszeniu flotacji troilitu (uzysk 73,48% w koncentracie). Zawartość troilitu w odpadzie wynosi 3,91%, co znacznie przekracza wymaganą zawartość wsadu hutniczego (0,1% siarczku żelaza).

Tabela 8.41. Wyniki analizy składu mineralnego chondrytu Tamdakht po separacji na drodze flotacji

| Faza mineralna | zawartość % | | | uzysk % | | |
|----------------|-------------|-------|----------|------------|-------|----------|
| | Koncentrat | Opad | Tamdakht | Koncentrat | opad | Tamdakht |
| F1 | | | | | | |
| oliwin | 72,48 | 86,28 | 81,83 | 28,58 | 71,42 | 100,00 |
| troilit | 16,66 | 0,13 | 5,46 | 98,39 | 1,61 | 100,00 |
| chromit | 0,74 | 0,69 | 0,71 | 33,82 | 66,18 | 100,00 |
| stop FeNi | 3,97 | 7,25 | 6,19 | 20,69 | 79,31 | 100,00 |
| F2 | | | | | | |
| oliwin | 86,21 | 74,38 | 81,83 | 66,31 | 33,69 | 100,00 |
| troilit | 6,38 | 3,91 | 5,46 | 73,48 | 26,52 | 100,00 |
| chromit | 0,73 | 0,66 | 0,70 | 65,26 | 34,74 | 100,00 |
| stop FeNi | 1,58 | 14,03 | 6,19 | 16,06 | 83,94 | 100,00 |

W tabelach 8.42 do 8.45 przedstawiono bilanse separacji w drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego oraz zbieracza aminowego dla stopu FeNi oraz troilitu (FeS). Na podstawie bilansów stwierdzić należy, że w przypadku zbieracza ksantogenianowego widoczne jest znaczne wzbogacenie troilitu (współczynnik wzbogacenia $k = 3,05$) w koncentracie z jednoczesnym niewielkim wzbogaceniem stopu FeNi w odpadzie ($k = 1,17$). Gdy do flotacji wykorzystany jest zbieracz aminowy, wzbogacenie stopu FeNi w odpadzie jest znacznie wydajniejsze ($k = 2,27$), jednak jednocześnie znacznie spada wartość współczynnik wzbogacania dla troilitu w koncentracie ($k = 1,17$).

Tabela 8.42. Bilans separacji stopu FeNi na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 16,2 | 32,27 | 3,97 | 0,64 | 20,69 |
| Odpad | 34,0 | 67,73 | 7,25 | 1,17 | 79,31 |
| Nadawa | 50,2 | 100,0 | 6,19 | 1 | 100,00 |

Tabela 8.43. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 16,2 | 32,27 | 16,66 | 3,05 | 98,39 |
| Odpad | 34,0 | 67,73 | 0,13 | 0,02 | 1,61 |
| Nadawa | 50,2 | 100,0 | 5,46 | 1 | 100,00 |

Tabela 8.44. Bilans separacji stopu FeNi na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 32,1 | 62,94 | 1,58 | 0,26 | 16,06 |
| Odpad | 18,9 | 37,06 | 14,03 | 2,27 | 83,94 |
| Nadawa | 51,0 | 100,00 | 6,19 | 1 | 100,00 |

Tabela 8.45. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego dla meteorytu Tamdakht

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 32,1 | 62,94 | 6,38 | 1,17 | 73,48 |
| Odpad | 18,9 | 37,06 | 3,91 | 0,72 | 26,52 |
| Nadawa | 51,0 | 100,00 | 5,46 | 1 | 100,00 |

W związku z uzyskanymi powyżej wynikami, proces flotacji jest najbardziej efektywny przy wykorzystaniu zbieracza ksantogenianowego z uwagi na dużą selektywność rozdzielenia troilitu. Te warunki flotacji zostaną wykorzystane przy testach wzbogacania rudy chondrytowej pochodzącej z meteorytu NWA 6410.

8.8.2. NWA 6410

Dla meteorytu NWA 6410, frakcji poniżej 100 μm , wykonano jeden test flotacyjny z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego. W tabeli 8.46 przedstawiono wyniki analizy QEMScan produktów flotacji. Ponownie zaszła bardzo dobra separacja troilitu (uzysk troilitu w koncentracie wyniósł 91,56%) przy jednoczesnym wzbogacaniu stopu FeNi w odpadzie (uzysk 73,43%). Odpad, który jest głównym produktem flotacji, zawiera 9,21% stopu FeNi, oraz 0,78% troilitu (wobec wymaganego 0,1%). Oznacza to, że uzyskana ruda chondrytowa, jeżeli miałaby być poddana procesom hutniczym wykorzystywanym obecnie na Ziemi,

musiałaby być dodatkowo oczyszczona z troilitu. Także chromit, który jest potencjalnym źródłem metali wzbogacił się przede wszystkim w odpadzie (uzysk 86%).

Tabela 8.46. Wyniki analizy składu mineralnego chondrytu NWA 6410 po separacji na drodze flotacji

| Faza mineralna | Zawartość % | | | Uzysk % | | |
|----------------|-------------|-------|----------|------------|-------|----------|
| | Koncentrat | Odpad | NWA 6410 | Koncentrat | odpad | NWA 6410 |
| oliwin | 45,67 | 83,03 | 75,80 | 11,67 | 88,33 | 100,00 |
| troilit | 35,26 | 0,78 | 7,46 | 91,56 | 8,44 | 100,00 |
| chromit | 0,61 | 0,90 | 0,84 | 14,00 | 86,00 | 100,00 |
| stop FeNi | 13,88 | 9,21 | 10,12 | 26,57 | 73,43 | 100,00 |

W tabelach 8.47 oraz 8.48 przedstawiono bilanse separacji w drodze flotacji. Badanie to potwierdziło skuteczność separacji troilitu (współczynnik wzbogacenia $k = 4,73$). W przypadku meteorytu NWA 6410 zauważono jednak gorszą jakość wzbogacania stopu FeNi. Wzbogacanie stopu FeNi w tym meteorycie zaszło również w koncentracie (współczynnik wzbogacania $k = 1,37$). Jednak uzysk żelaza w odpadzie (73,42%) w dalszym ciągu jest zadawalający.

Tabela 8.47. Bilans separacji stopu FeNi na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego dla meteorytu NWA 6410

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 19,0 | 19,37 | 13,88 | 1,37 | 26,58 |
| Odpad | 79,1 | 80,63 | 9,21 | 0,91 | 73,42 |
| Nadawa | 98,1 | 100,00 | 10,11 | 1 | 100,00 |

Tabela 8.48. Bilans separacji troilitu (FeS) na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego dla meteorytu NWA 6410

| Produkt | Wychód, γ g | Wychód, γ % | Zawartość, λ % | Współczynnik wzbogacania k | Uzysk, ϵ % |
|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Koncentrat | 19,0 | 19,37 | 35,26 | 4,73 | 91,57 |
| Odpad | 79,1 | 80,63 | 0,78 | 0,10 | 8,43 |
| Nadawa | 98,1 | 100,00 | 7,46 | 1 | 100,00 |

8.9. Analiza wzbogacania wybranych metali oraz siarki

Z uwagi na uzyskane wyniki analiz mineralnych oraz chemicznych produktów procesów separacji i wzbogacania, za potencjalne surowce metaliczne, które można pozyskać z chondrytów zwyczajnych uznać należy: żelazo, nikiel, kobalt oraz miedź. Za potencjalne surowce metaliczne uznać należy również chrom, tytan, wanad oraz cynk, które wchodzi w skład chromitu, jednak wykorzystane procesy przerobcze nie spowodowały znaczącego wzbogacenia któregośkolwiek produktu w chromit. Głębszej analizie w niniejszym rozdziale została poddana również siarka jako surowiec występujący w chondrytach w znacznej koncentracji, a jednocześnie surowiec, którego w toku procesów przerobczych należałoby się pozbyć z uwagi na negatywny wpływ przy dalszej obróbce metali. Siarka jednocześnie może

być użytecznym surowcem chemicznym, w związku z czym oddzielenie troilitu od reszty minerałów jest bardzo korzystne. Powyższa lista metali nie wyczerpuje potencjału rudy chondrytowej jako źródła innych metali i surowców niemetalicznych, jednakże nie są one przedmiotem rozważań niniejszej pracy.

W rozdziale tym przedstawione są wyniki analiz chemicznych poszczególnych produktów wzbogacania oraz przedstawiono potencjalny ciąg technologiczny, który może być wykorzystany w pozyskaniu koncentratów wybranych pierwiastków. Wyniki przedstawione we wcześniejszych rozdziałach wskazują, że jedynie rozdrabnianie skały rudnej jako proces wzbogacania oraz flotacja frakcji ziaren o średnicy poniżej 100 μm dało znaczące pozytywne rezultaty.

8.9.1. Żelazo

Średnia zawartość masowa żelaza w chondrytach zwyczajnych to 27,2% dla grupy H oraz 21,8% dla grupy L (McSween i Huss, 2010). W chondrytach zwyczajnych żelazo występuje powszechnie w większości minerałów, przede wszystkim są to rudne minerały stopu FeNi (kamacyt, taenit, tetrataenit), siarczki (troilit), tlenki (chromit) oraz krzemiany (oliwiny i pirokseny). W tabeli 8.49 przedstawiono średnią zawartość żelaza w minerałach występujących w badanych chondrytach. Jako źródło żelaza upatruje się przede wszystkim minerałów stopu FeNi: kamacytu (ok. 93,3% Fe), taenitu (ok. 65% Fe) oraz tetrataenitu (ok. 48% Fe). Ostatnim minerałem o wysokiej zawartości żelaza stanowiącym potencjalne źródło tego pierwiastka jako produkt uboczny jest chromit (ok. 30% Fe). Troilit, chociaż zawiera ok. 62,8% Fe i stanowi do 7% obj. chondrytów zwyczajnych grupy H i L, jest minerałem niepożądanym z uwagi na siarkę wchodzącą w jego skład. Również oliwiny i pirokseny zawierają znaczne ilości żelaza, jednakże nie są one brane pod uwagę jako źródło tego pierwiastka, z uwagi na znaczną energochłonność procesów niezbędnych do jego uwolnienia z tych minerałów krzemianowych.

Tabela 8.49. Zawartość żelaza w minerałach występujących w chondrytach Tamdakht oraz NWA 6410

| Minerał | Tamdakht (grupa H) | NWA 6410 (grupa L) |
|-------------|--------------------|--------------------|
| | % | |
| Kamacyt | 93,27 | 93,44 |
| Taenit | 64,52 | 65,57 |
| Tetrataenit | 48,38 | 47,62 |
| Troilit | 62,91 | 62,76 |
| Chromit | 29,18 | 31,66 |
| Oliwin | 17,04 | 23,46 |
| Piroksen | 11,09 | 14,29 |
| Skaleń | 0,45 | 0,53 |

W tabeli 8.50 przedstawiono wyniki procesów wzbogacania dla żelaza.

Tabela 8.50. Bilans separacji minerałów zawierających żelazo. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego

| proces | Wychód | | | zawartość | | | uzysk | | | współczynnik wzbogacania | |
|----------|--------|-------|-----|-----------|-------|-------|-------|-------|-----|--------------------------|------|
| | % | | | % | | | % | | | - | |
| | K | O | N | K | O | N | K | O | N | K | O |
| Tamdakht | | | | | | | | | | | |
| KM | 15,78 | 84,22 | 100 | 80,33 | 15,13 | 25,42 | 49,87 | 50,13 | 100 | 3,16 | 0,60 |
| SK1 | 56,57 | 43,43 | 100 | 17,66 | 11,84 | 15,13 | 66,02 | 33,98 | 100 | 1,17 | 0,78 |
| SK2 | 69,20 | 30,80 | 100 | 81,10 | 78,60 | 80,33 | 69,86 | 30,14 | 100 | 1,01 | 0,98 |
| F1 | 32,27 | 67,73 | 100 | 18,77 | 11,35 | 13,74 | 44,07 | 55,93 | 100 | 1,37 | 0,83 |
| F2 | 62,94 | 37,06 | 100 | 12,48 | 15,54 | 13,61 | 57,70 | 42,30 | 100 | 0,92 | 1,14 |
| NWA 6410 | | | | | | | | | | | |
| KM | 7,07 | 92,93 | 100 | 59,60 | 16,48 | 19,53 | 21,57 | 78,43 | 100 | 3,05 | 0,84 |
| F1 | 19,37 | 80,63 | 100 | 26,69 | 13,22 | 15,83 | 32,66 | 67,34 | 100 | 1,69 | 0,84 |

Z uwagi na to, że żelazo występuje niemal we wszystkich minerałach budujących chondryty zwyczajne, sama jego zawartość w poszczególnych produktach nie daje wiarygodnej informacji o jakości przeprowadzonego procesu. Jednakże biorąc pod uwagę również wyniki analiz mineralnych produktów procesów wzbogacania, a także wyników dla niklu (który występuje niemal wyłącznie w stopie FeNi) oraz siarki (występującej niemal całkowicie w troilicie) widoczne wzbogacenie koncentratów w wyniku procesów rozdrabniania musi być wynikiem przede wszystkim wzbogacania tych produktów w stop FeNi. Dla obu meteorytów zawartość żelaza w koncentracie jest ponad 3-krotnie wyższa niż w nadawie. Zauważalne jest również wzbogacenie w żelazo w koncentraty dla flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego (zawartość większa o 36% dla meteorytu Tamdakht oraz o 69% dla meteorytu NWA 6410).

Tabela 8.51. Uzysk stopu FeNi oraz żelaza w procesach przeróbczych

| Składnik | Tamdakht | | | NWA 6410 | | |
|---|-------------|---------|-----------|-------------|---------|-----------|
| | Zawartość % | Uzysk % | Σ Uzysk % | Zawartość % | Uzysk % | Σ Uzysk % |
| Proces rozdrabniania | | | | | | |
| stop FeNi | 89,44 | 70,30 | 70,30 | 44,83 | 27,80 | 27,80 |
| Fe | 80,33 | 49,87 | 49,87 | 59,60 | 21,57 | 21,57 |
| Flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego | | | | | | |
| stop FeNi | 7,25 | 79,31 | 93,86 | 9,21 | 73,43 | 80,82 |
| Fe | 11,35 | 55,93 | 77,91 | 13,22 | 67,34 | 74,38 |
| Flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | | | | | | |
| stop FeNi | 14,03 | 83,94 | 95,23 | - | - | - |
| Fe | 15,54 | 42,30 | 71,07 | - | - | - |

W tabeli 8.51 przedstawiono potencjalny proces pozyskiwania koncentratu żelaza z rudy chondrytowej. Dla chondrytu grupy H, o dużych, masywnych ziarnach stopu FeNi proces można by zakończyć już na samym procesie rozdrabniania, w wyniku którego pozyskano produkt o zawartości ziaren stopu FeNi 89,44%, przy uzysku 70,30%. Dla chondrytu grupy L,

który zawierał większą ilość ziaren mniejszych, bardziej podatnych na rozdrabnianie z uwagi na ich budowę w identycznym procesie pozyskano produkt o zawartości ziaren stopu FeNi 44,83%, przy uzysku 27,80%. W przypadku meteorytu Tamdakht opcjonalne jest dalsze wzbogacenie odpadu. Największy sumaryczny uzysk jest dla flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego (łączny uzysk 95,23% stopu FeNi, oraz 71,07 żelaza w ogóle), jednak z uwagi na wysoką zawartość troilitu w produkcie tego procesu preferowana jest flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego (łączny uzysk 93,86% stopu FeNi, oraz 71,07% żelaza w ogóle). Dla chondrytu NWA 6410 flotacja jest naturalnym kolejnym etapem procesu wzbogacania, w którym łączny uzysk wynosi 80,82% ziaren stopu FeNi oraz 74,38% żelaza w ogóle.

8.9.2. Nikiel

Średnia zawartość masowa niklu w chondrytach zwyczajnych wynosi 1,71% dla grupy H oraz 1,24% dla grupy L (McSween i Huss, 2010). W chondrytach zwyczajnych nikiel występuje przede wszystkim w minerałach rudnych stopu FeNi (kamacyt, taenit, tetrataenit), a także w niewielkiej ilości w troilicie oraz chromicie. W tabeli 8.52 przedstawiono średnią zawartość niklu w minerałach występujących w badanych chondrytach. Jako źródło niklu upatruje się przede wszystkim minerałów stopu FeNi: kamacytu (ok. 5,86% Ni), taenitu (ok. 34% Ni) oraz tetrataenitu (ok. 51% Ni).

Tabela 8.52. Zawartość niklu w minerałach występujących w chondrytach Tamdakht oraz NWA 6410

| Minerał | Tamdakht (grupa H) | NWA 6410 (grupa L) |
|-------------|--------------------|--------------------|
| | % | |
| Kamacyt | 5,82 | 5,92 |
| Taenit | 35,52 | 33,67 |
| Tetrataenit | 50,58 | 51,58 |
| Troilit | 0,11 | 0,02 |
| Chromit | 0,03 | 0,01 |

W tabeli 8.53 przedstawiono wyniki procesów wzbogacania dla niklu.

Tabela 8.53. Bilans separacji minerałów zawierających nikiel. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego

| proces | Wychód | | | zawartość | | | uzysk | | | współczynnik wzbogacania | |
|----------|--------|-------|-----|-----------|------|------|-------|-------|-----|--------------------------|------|
| | % | | | % | | | % | | | - | |
| | K | O | N | K | O | N | K | O | N | K | O |
| Tamdakht | | | | | | | | | | | |
| KM | 15,78 | 84,22 | 100 | 7,46 | 0,72 | 1,79 | 65,80 | 34,20 | 100 | 4,17 | 0,41 |
| SK1 | 56,57 | 43,43 | 100 | 1,10 | 0,23 | 0,72 | 86,11 | 13,89 | 100 | 1,52 | 0,32 |
| SK2 | 69,20 | 30,80 | 100 | 8,02 | 6,19 | 7,46 | 74,43 | 25,57 | 100 | 1,08 | 0,83 |
| F1 | 32,27 | 67,73 | 100 | 0,90 | 0,59 | 0,69 | 42,12 | 57,88 | 100 | 1,31 | 0,85 |
| F2 | 62,94 | 37,06 | 100 | 0,29 | 1,38 | 0,70 | 26,59 | 73,41 | 100 | 0,42 | 1,98 |
| NWA 6410 | | | | | | | | | | | |
| KM | 7,07 | 92,93 | 100 | 8,88 | 0,62 | 1,20 | 52,28 | 47,72 | 100 | 7,40 | 0,51 |
| F1 | 19,37 | 80,63 | 100 | 0,49 | 0,58 | 0,57 | 16,73 | 83,27 | 100 | 0,86 | 1,03 |

Z uwagi na to, że nikiel występuje niemal wyłącznie w minerałach stopu FeNi widoczne wzbogacenie koncentratów w wyniku procesów rozdrabniania musi być wynikiem przede wszystkim wzbogacenia tych produktów w stop FeNi. Dla obu meteorytów zauważano znaczne wzbogacenie w nikiel koncentratu z procesu wzbogacania poprzez rozdrabnianie – zawartość w koncentracie dla meteorytu Tamdakht jest ponad 4-krotnie większa niż w nadawie, natomiast dla meteorytu NWA 6410 ponad 7-krotnie. Zauważalne jest także znaczne wzbogacenie w nikiel odpadu w procesie flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego.

Tabela 8.54. Uzysk stopu FeNi oraz niklu w procesach przerobczych

| Składnik | Tamdakht | | | NWA 6410 | | |
|---|-------------|---------|-----------|-------------|---------|-----------|
| | Zawartość % | Uzysk % | Σ Uzysk % | Zawartość % | Uzysk % | Σ Uzysk % |
| Proces rozdrabniania | | | | | | |
| stop FeNi | 89,44 | 70,30 | 70,30 | 44,83 | 27,80 | 27,80 |
| Ni | 7,46 | 65,80 | 65,80 | 8,88 | 52,28 | 52,28 |
| Flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego | | | | | | |
| stop FeNi | 7,25 | 79,31 | 93,86 | 9,21 | 73,43 | 80,82 |
| Ni | 0,59 | 57,88 | 85,59 | 0,58 | 83,27 | 92,02 |
| Flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | | | | | | |
| stop FeNi | 14,03 | 83,94 | 95,23 | - | - | - |
| Ni | 1,38 | 73,41 | 90,91 | - | - | - |

W tabeli 8.54 przedstawiono potencjalny proces pozyskiwania koncentratu niklu z rudy chondrytowej. Dla chondrytu grupy H, o dużych, masywnych ziarnach stopu FeNi wzbogacenie można by zakończyć już na samym procesie rozdrabniania, w wyniku którego pozyskano produkt o zawartości ziaren stopu FeNi 89,44%, przy uzysku 70,30%. Dla chondrytu grupy L, który zawierał większą ilość ziaren mniejszych, bardziej podatnych na rozdrabnianie z uwagi na ich budowę w identycznym procesie pozyskano produkt o zawartości ziaren stopu FeNi 44,83%, przy uzysku 27,80%. W przypadku meteorytu Tamdakht opcjonalne jest dalsze wzbogacenie odpadu. Największy sumaryczny uzysk jest obserwowany dla procesu flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego (łączny uzysk 95,23% stopu FeNi, oraz 90,91% niklu w ogóle), jednak z uwagi na wysoką zawartość troilitu w produkcie tego procesu preferowana jest flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego (łączny uzysk 93,86% stopu FeNi, oraz 85,59% niklu w ogóle). Dla chondrytu NWA 6410 flotacja jest naturalnym kolejnym etapem procesu wzbogacania, w którym łączny uzysk wynosi 80,82% ziaren stopu FeNi oraz 92,02% niklu w ogóle.

8.9.3. Kobalt

Średnia zawartość masowa kobaltu w chondrytach zwyczajnych wynosi 830 ppm dla grupy H oraz 580 ppm dla grupy L (McSween i Huss, 2010). W chondrytach zwyczajnych kobalt występuje przede wszystkim w minerałach rudnych stopu FeNi (kamacyt, taenit, tetrataenit). W tabeli 8.55 przedstawiono średnią zawartość kobaltu w minerałach występujących w badanych chondrytach. Jako źródła kobaltu upatruje się przede wszystkim jedną z faz stopu FeNi – kamacyt, w której pierwiastek ten się koncentruje.

Tabela 8.55. Zawartość kobaltu w minerałach występujących w chondrytach Tamdakht oraz NWA 6410

| Minerał | Tamdakht (grupa H) | NWA 6410 (grupa L) |
|-------------|--------------------|--------------------|
| | % | |
| Kamacyt | 0,37 | 0,64 |
| Taenit | 0,04 | 0,22 |
| Tetrataenit | 0,02 | 0,05 |

W tabeli 8.56 przedstawiono wyniki procesów wzbogacania dla kobaltu.

Tabela 8.56. Bilans separacji minerałów zawierających kobalt. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego

| proces | wychód | | | zawartość | | | uzysk | | | współczynnik wzbogacania | |
|----------|--------|-------|-----|-----------|--------|--------|-------|-------|-----|--------------------------|------|
| | % | | | ppm | | | % | | | - | |
| | K | O | N | K | O | N | K | O | N | K | O |
| Tamdakht | | | | | | | | | | | |
| KM | 15,78 | 84,22 | 100 | 3670,1 | 160,6 | 714,3 | 81,06 | 18,94 | 100 | 5,14 | 0,22 |
| SK1 | 56,57 | 43,43 | 100 | 212,2 | 93,4 | 160,6 | 74,75 | 25,25 | 100 | 1,32 | 0,58 |
| SK2 | 69,20 | 30,80 | 100 | 3691,5 | 3621,9 | 3670,1 | 69,61 | 30,39 | 100 | 1,01 | 0,99 |
| F1 | 32,27 | 67,73 | 100 | 110,3 | 171,7 | 151,9 | 23,44 | 76,56 | 100 | 0,73 | 1,13 |
| F2 | 62,94 | 37,06 | 100 | 75,3 | 276,1 | 149,7 | 31,66 | 68,34 | 100 | 0,50 | 1,84 |
| NWA 6410 | | | | | | | | | | | |
| KM | 7,07 | 92,93 | 100 | 4770,0 | 216,6 | 538,4 | 62,61 | 37,39 | 100 | 8,86 | 0,40 |
| F1 | 19,37 | 80,63 | 100 | 257,8 | 186,8 | 200,6 | 24,90 | 75,10 | 100 | 1,29 | 0,93 |

Z uwagi na to, że kobalt występuje niemal wyłącznie w stopie FeNi, wyniki oznaczenia zawartości tego pierwiastka w poszczególnych produktach dają pewien pogląd na jakość procesów separacji i wzbogacania zwłaszcza kamacytu. Dla obu meteorytów zaobserwowano znaczne wzbogacenie w kobalt w koncentratkach po przeprowadzeniu procesów rozdrabniania. Dla meteorytu Tamdakht zawartość kobaltu w koncentracie jest ponad 5-krotnie większa niż w nadawie (zawartość w odpadzie niemal 5-krotnie mniejsza), natomiast dla meteorytu NWA 6410 prawie 9-krotnie większa (zawartość w odpadzie 2,5-krotnie mniejsza).

Tabela 8.57. Uzysk stopu FeNi oraz kobaltu w procesach przerobczych

| Składnik | Tamdakht | | | NWA 6410 | | |
|---|-------------|---------|-----------|-------------|---------|-----------|
| | Zawartość % | Uzysk % | Σ Uzysk % | Zawartość % | Uzysk % | Σ Uzysk % |
| Proces rozdrabniania | | | | | | |
| stop FeNi | 89,44 | 70,30 | 70,30 | 44,83 | 27,80 | 27,80 |
| Co | 0,367 | 81,06 | 81,06 | 0,477 | 62,61 | 62,61 |
| Flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego | | | | | | |
| stop FeNi | 7,25 | 79,31 | 93,86 | 9,21 | 73,43 | 80,82 |
| Co | 0,017 | 76,56 | 95,56 | 0,019 | 75,10 | 90,69 |
| Flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | | | | | | |
| stop FeNi | 14,03 | 83,94 | 95,23 | - | - | - |
| Co | 0,028 | 68,34 | 94,00 | - | - | - |

W tabeli 8.57 przedstawiono potencjalny proces pozyskiwania koncentratu kobaltu z rudy chondrytowej. Dla chondrytu grupy H, o dużych, masywnych ziarnach stopu FeNi proces można by zakończyć już na samym procesie rozdrabniania, w wyniku którego pozyskano produkt o zawartości ziaren stopu FeNi 89,44%, przy uzysku 70,30%. Dla chondrytu grupy L, który zawierał większą ilość ziaren mniejszych, bardziej podatnych na rozdrabnianie z uwagi na ich budowę w identycznym procesie pozyskano produkt o zawartości ziaren stopu FeNi 44,83%, przy uzysku 27,80%. W przypadku meteorytu Tamdakht opcjonalne jest dalsze wzbogacenie odpadu. Największy sumaryczny uzysk stopu FeNi jest obserwowany w procesie flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego (łączny uzysk 95,23% stopu FeNi, oraz 94,00% kobaltu w ogóle), jednak z uwagi na dużą zawartość troilitu w produkcie tego procesu preferowana jest flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, w której otrzymano największy łączny uzysk kobaltu (łączny uzysk 93,86% stopu FeNi, oraz 95,56% kobaltu w ogóle). Dla chondrytu NWA 6410 flotacja jest naturalnym kolejnym etapem procesu wzbogacania, w którym łączny uzysk wynosi 80,82% ziaren stopu FeNi oraz 90,69% kobaltu w ogóle.

8.9.4. Miedź

Średnia zawartość masowa miedzi w chondrytach zwyczajnych wynosi 94 ppm dla grupy H oraz 90 ppm dla grupy L (McSween i Huss, 2010). W chondrytach zwyczajnych miedź występuje przede wszystkim w minerałach rudnych stopu FeNi (kamacyt, taenit, tetrataenit), a także w niewielkiej ilości w troilicie oraz jako miedź rodzima. W tabeli 8.58 przedstawiono średnią zawartość miedzi w minerałach występujących w badanych chondrytach. Jako źródło miedzi traktować należy przede wszystkim dwie fazy stopu FeNi – taenit oraz tetrataenit, w których pierwiastek ten się koncentruje.

Tabela 8.58. Zawartość miedzi w minerałach występujących w chondrytach Tamdakht oraz NWA 6410

| Minerał | Tamdakht (grupa H) | NWA 6410 (grupa L) |
|-------------|--------------------|--------------------|
| | % | |
| Kamacyt | 0,01 | 0,01 |
| Taenit | 0,19 | 0,16 |
| Tetrataenit | 0,26 | 0,22 |
| Troilit | 0,02 | 0,01 |

W tabeli 8.59 przedstawiono wyniki procesów wzbogacania dla miedzi.

Tabela 8.59. Bilans separacji minerałów zawierających miedź. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego

| proces | Wychód | | | zawartość | | | uzysk | | | współczynnik wzbogacania | |
|----------|--------|-------|-----|-----------|-------|-------|-------|-------|-----|--------------------------|------|
| | % | | | ppm | | | % | | | - | |
| | K | O | N | K | O | N | K | O | N | K | O |
| Tamdakht | | | | | | | | | | | |
| KM | 15,78 | 84,22 | 100 | 200,3 | 130,6 | 141,6 | 22,32 | 77,68 | 100 | 1,41 | 0,92 |
| SK1 | 56,57 | 43,43 | 100 | 156,1 | 97,4 | 130,6 | 67,62 | 32,38 | 100 | 1,20 | 0,75 |
| SK2 | 69,20 | 30,80 | 100 | 226,0 | 142,7 | 200,3 | 78,06 | 21,94 | 100 | 1,13 | 0,71 |
| F1 | 32,27 | 67,73 | 100 | 362,8 | 95,3 | 181,6 | 64,46 | 35,54 | 100 | 2,00 | 0,52 |
| F2 | 62,94 | 37,06 | 100 | 119,5 | 129,7 | 123,3 | 61,01 | 38,99 | 100 | 0,97 | 1,05 |
| NWA 6410 | | | | | | | | | | | |
| KM | 7,07 | 92,93 | 100 | 434,7 | 77,4 | 102,7 | 29,93 | 70,07 | 100 | 4,23 | 0,75 |
| F1 | 19,37 | 80,63 | 100 | 365,1 | 89,6 | 143,0 | 49,46 | 50,54 | 100 | 2,55 | 0,63 |

Z uwagi na to, że miedź występuje niemal wyłącznie w minerałach stopu FeNi widoczne wzbogacenie koncentratów w wyniku procesów rozdrabniania musi być przede wszystkim rezultatem wzbogacania tych produktów w stop FeNi, przede wszystkim taenitu oraz tetrataenitu. Dla obu meteorytów zauważano znaczne wzbogacenie w miedź koncentratu z procesu wzbogacania poprzez rozdrabnianie – zawartość w koncentracie dla meteorytu Tamdakht jest około 1,4-krotnie większa niż w nadawie, natomiast dla meteorytu NWA 6410 ponad 4-krotnie. Nie bez znaczenia jest mały uzysk miedzi w koncentracie dla meteorytu Tamdakht. Wskazywać może to na znaczny udział małych ziaren stopów miedzi i innych metali w skale rudnej. Widoczne wzbogacenie w miedź koncentratu flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego ma związek z wykorzystaniem jednego z odczynników (siarczan (VI) miedzi(II)) i uzyskane wyniki dla F1 nie są wiarygodne.

Na podstawie uzyskanych danych nie można określić w sposób jednoznaczny procesu, w którym uzysk miedzi byłby największy. Założenia, że miedź występuje przede wszystkim w minerałach stopu FeNi nie potwierdzają analizy chemiczne produktów wzbogacania na drodze rozdrabniania rudy chondrytowej. W takiej sytuacji uzysk miedzi w koncentracie dla chondrytu Tamdakht powinien, podobnie jak dla niklu czy kobaltu, wynieść powyżej 60%, natomiast otrzymany uzysk to 22,32%. Jednoznacznie wskazuje to na obecność drobnych ziaren stopów metalicznych bogatych w miedź oraz ziaren miedzi rodzimej. Obecność odczynnika zawierającego miedź we flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego nie pozwala również na poprawną ocenę bilansu flotacji miedzi. Jedynie wyniki flotacji z wykorzystaniem zbieracza aminowego można zinterpretować jako brak wzbogacania.

8.9.5. Siarka

Siarka występuje w chondrytach zwyczajnych powszechnie, znacznie częściej niż w skorupie ziemskiej. Średnia zawartość masowa siarki w chondrytach zwyczajnych wynosi 2,0% dla grupy H oraz 2,2% dla grupy L (McSween i Huss, 2010). Siarka wchodzi głównie w skład siarczku żelaza – troilitu (Rubin i Ma, 2017). W tabeli 8.60 przedstawiono wyniki procesów wzbogacania dla siarki.

Tabela 8.60. Bilans separacji minerałów zawierających siarkę. K – koncentrat, O – odpad, N – nadawa. Procesy: KM – wzbogacanie poprzez kruszenie i mielenie rudy, SK1 – wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji poniżej 100 µm, SK2 - wzbogacania na stole koncentracyjnym frakcji powyżej 100 µm, F1 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego, F2 – flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego

| proces | wychód | | | zawartość | | | uzysk | | | współczynnik wzbogacania | |
|----------|--------|-------|-----|-----------|------|------|-------|-------|-----|--------------------------|------|
| | % | | | % | | | % | | | - | |
| | K | O | N | K | O | N | K | O | N | K | O |
| Tamdakht | | | | | | | | | | | |
| KM | 15,78 | 84,22 | 100 | 0,12 | 2,15 | 1,83 | 1,03 | 98,97 | 100 | 0,07 | 1,18 |
| SK1 | 56,57 | 43,43 | 100 | 2,42 | 1,80 | 2,15 | 63,66 | 36,34 | 100 | 1,13 | 0,84 |
| SK2 | 69,20 | 30,80 | 100 | 0,11 | 0,14 | 0,12 | 63,84 | 36,16 | 100 | 0,92 | 1,17 |
| F1 | 32,27 | 67,73 | 100 | 4,85 | 0,54 | 1,93 | 81,06 | 18,94 | 100 | 2,51 | 0,28 |
| F2 | 62,94 | 37,06 | 100 | 2,11 | 1,65 | 1,94 | 68,47 | 31,53 | 100 | 1,09 | 0,85 |
| NWA 6410 | | | | | | | | | | | |
| KM | 7,07 | 92,93 | 100 | 0,16 | 2,06 | 1,93 | 0,59 | 99,41 | 100 | 0,08 | 1,07 |
| F1 | 19,37 | 80,63 | 100 | 7,63 | 0,29 | 1,71 | 86,34 | 13,66 | 100 | 4,46 | 0,17 |

W wyniku działania procesów rozdrabniania uzyskane koncentraty zostały zubożone w siarkę (zawartość dla meteorytu Tamdakht 15,25-krotnie mniejsza niż w nadawie, natomiast dla meteorytu NWA 6410 12-krotnie mniejsza). Ponadto zaobserwowano znaczne wzbogacenie siarki w koncentraty flotacji przeprowadzonej z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego (zawartość siarki dla chondrytu Tamdakht wzrosła 2,5-krotnie, a dla NWA 6410 4,5-krotnie), przy jednoczesnym znacznym zubożeniu w ten składnik odpadów. Wyniki te świadczą o dobrym rozdziale siarczków w wykorzystanych procesach przerobczych.

Tabela 8.61. Uzysk troilitu oraz siarki w procesach przerobczych

| Składnik | Tamdakht | | | NWA 6410 | | |
|---|-------------|---------|-----------|-------------|---------|-----------|
| | Zawartość % | Uzysk % | Σ Uzysk % | Zawartość % | Uzysk % | Σ Uzysk % |
| Proces rozdrabniania | | | | | | |
| troilit | 0,24 | 0,82 | 0,82 | 0,98 | 1,13 | 1,13 |
| S | 0,12 | 1,03 | 1,03 | 0,16 | 0,59 | 0,59 |
| Flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego | | | | | | |
| troilit | 0,13 | 1,61 | 2,42 | 0,78 | 8,44 | 8,34 |
| S | 0,54 | 18,94 | 18,74 | 0,29 | 13,66 | 13,58 |
| Flotacja z wykorzystaniem zbieracza aminowego | | | | | | |
| troilit | 3,91 | 26,52 | 26,30 | - | - | - |
| S | 1,65 | 31,53 | 31,20 | - | - | - |

W tabeli 8.61 przedstawiono zawartości i uzyski troilitu oraz siarki w koncentraty FeNi. W tym przypadku najlepszy wynik otrzymano stosując proces dający najmniejszy uzysk siarki. W tabeli wyniki analizy chemicznej zawartości siarki w produktach flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego nie są wiarygodne z uwagi na obecność siarki w jednym z odczynników użytych w tym procesie. Jednak wiedząc, że niemal cała siarka w chondrytach zwyczajnych znajduje się w troilicie, na podstawie samej zawartości troilitu można wnioskować, że flotacja z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego przebiega w

najkorzystniejszy sposób. Ostateczny uzysk troilitu to 2,42% dla meteorytu Tamdakht oraz 8,34% dla meteorytu NWA 6410.

9. Wnioski

Autor wykonał badania dotyczące pozyskiwania wybranych surowców metalicznych przeprowadzone na materiale chondrytowym, traktowanym jako ruda chondrytowa reprezentowana przez bogate w żelazo chondryty H (Tamdakht) oraz ubogie w żelazo chondryty L (NWA 6410). Odzwierciedlają one budowę macierzystych obiektów, jakimi w Układzie Słonecznym są planetoidy typu S. W badaniach skupiono się na wyodrębnieniu stopu FeNi, będącego potencjalnym źródłem żelaza, niklu, kobaltu i być może również miedzi, oraz odseparowaniu od niego troilitu (FeS). Obecność siarczku żelaza powoduje wzbogacenie potencjalnego produktu – stali w siarkę, co znacznie pogarsza jej właściwości mechaniczne i uniemożliwia jej obróbkę. Na podstawie przeprowadzonych analiz wyciągnięto następujące wnioski.

Już sam proces rozdrobnienia skały chondrytowej połączony z analizą sitową, w celu wyodrębnienia grubszej frakcji może być wystarczającym procesem wzbogacania rud chondrytowych w stop FeNi. Na przykładzie analiz rudy uzyskanej z chondrytu H Tamdakht, którą poddano kruszeniu, mieleniu oraz rozdziałowi na dwie frakcje ziarnowe otrzymano koncentrat w postaci frakcji powyżej 100 μm o zawartości stopu FeNi równej 88,24% przy uzysku równym 65,68%. Jednocześnie zawartość troilitu (FeS) w koncentracie wyniosła 0,24% przy uzysku równym 0,81%. Przy uwzględnieniu we frakcji powyżej 100 μm również frakcji powyżej 500 μm , zawartość stopu FeNi jest równa 89,44% przy uzysku równym 70,30%. Jednocześnie zawartość troilitu (FeS) w koncentracie wyniosła 0,25% przy uzysku równym 1,03%. Mogłoby to oznaczać, że koncentrat żelaza oraz niklu można pozyskać stosunkowo prostą i taną metodą, możliwą do zastosowania również w warunkach pozaziemskich przy ograniczonej dostępności wody. Wniosek ten jednak jest oparty na podstawie przeprowadzania procesów w warunkach ziemskich. Ponadto badania przeprowadzone na rudzie uzyskanej z chondrytu NWA 6410, reprezentującego rudę uboższą w metale (chondryty zwyczajne grupy L) nie potwierdzają uniwersalności użycia tego procesu do wzbogacania stopu FeNi. Ponadto w warunkach panujących w przestrzeni kosmicznej, gdzie temperatura bliska jest zeru absolutnemu być może ziarna stopu FeNi będą bardziej podatne na kruszenie. Kwestie te powinny być obiektem dalszych badań.

Aby usunąć większą część troilitu z frakcji ziaren powyżej 100 μm należałoby frakcję tę rozdrobnić jeszcze bardziej. Troilit występuje przede wszystkim w zrostach z ziarnami FeNi, lub jest w nich odmieszany. Głębsze mielenie pozwoli uwolnić dodatkowe ziarna troilitu, a także umożliwi usunięcie go innymi metodami przeróbczymi, np. flotacją, gdzie ziarna nadawy powinny mieć średnicę poniżej 100 μm .

Przeprowadzone badania wzbogacania rudy chondrytowej wykazały, że separacja magnetyczna, separacja w cieczy ciężkiej oraz separacja na stole koncentracyjnym nie mają praktycznego zastosowania. Separacja magnetyczna nie jest użyteczna z uwagi na występujące w chondrach domieszki bardzo drobnych ziaren stopu FeNi, co uniemożliwia selektywny rozdział badanego materiału. Separacja w cieczach ciężkich nie ma zastosowania z uwagi na dużą gęstość minerałów, które takiej separacji miałyby być poddane. Znane cieczy ciężkie mają zbyt małą gęstość, a zastosowanie cieczy magnetycznych jest niemożliwe z uwagi na właściwości magnetyczne separowanych minerałów. Co więcej minerały występujące w rudzie chondrytowej wchodziły w reakcje chemiczne z cieczami ciężkimi. Separacja na stole koncentracyjnym nie znajduje zastosowania z uwagi na zbyt małą selektywność rozdziału

ziaren stopu FeNi oraz troilitu, prawdopodobnie ze względu na zbyt małe różnice gęstości separowanych ziaren i ich zrosty.

Przeprowadzone badania wykazały możliwość separacji ziaren stopu FeNi od ziaren troilitu (FeS) na drodze flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego. Proces ten pozwala na usunięcie z produktu od 91% do 98% troilitu, przy zachowaniu 73-79% stopu FeNi we frakcji ziarnowej poniżej 100 μm . Ma to bardzo duże znaczenie w przypadku rudy chondrytowej, która nie podlega znacznemu wzbogaceniu przy zastosowaniu jedynie procesu rozdrabniania.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że w celu pozyskania możliwie największej części stopu FeNi, przy jednoczesnym odseparowaniu ziaren FeS, będących składnikiem niepożądanym, jest wspólne wykorzystanie wzbogacania poprzez proces kruszenia oraz flotacji z wykorzystaniem zbieracza ksantogenianowego. W trakcie pierwszego procesu pozyskany zostaje koncentrat stopu FeNi o średnicy ziaren powyżej 100 μm , natomiast do flotacji kierowany jest odpad – ziarna o średnicy poniżej 100 μm , który należy oczyścić z troilitu (FeS). Wykorzystanie tych procesów pozwoliło na otrzymanie uzysku 93,86% stopu FeNi dla meteorytu Tamdakht oraz 80,82% dla meteorytu NWA 6410, przy jednoczesnym usunięciu z produktów 97,58% troilitu dla meteorytu Tamdakht oraz 91,66% troilitu dla meteorytu NWA 6410. Uzysk niklu wyniósł 85,59% dla meteorytu Tamdakht oraz 92,02% dla meteorytu NWA 6410. Uzysk kobaltu wyniósł 95,56% dla meteorytu Tamdakht oraz 90,69% dla meteorytu NWA 6410. Uzysk żelaza wyniósł 77,91% dla meteorytu Tamdakht oraz 74,38% dla meteorytu NWA 6410. Jednak z uwagi na obecność żelaza w niemal wszystkich minerałach budujących skały chondrytowe jego uzysk nie stanowi istotnej informacji dotyczącej jakości procesu.

Wydaje się niezbędne przeprowadzenie dalszych badań nad wzbogacaniem rudy chondrytowej przy uwzględnieniu wyników badań przedstawionych w niniejszej pracy. W dalszych badaniach, oprócz wykorzystania większej ilości materiału badawczego, wskazane byłoby wykorzystanie separacji z wykorzystaniem zjawisk elektrycznych, dalszych testów flotacyjnych z wykorzystaniem innych odczynników oraz przeprowadzenie kolejnych testów na już pozyskanych produktach wzbogacania rudy chondrytowej, które prowadziłyby do opracowania całego ciągu technologicznego. W szczególności skupić należy się na pozyskaniu czystszej koncentratu stopu FeNi z produktów oczyszczonych z troilitu (we frakcji poniżej 100 μm), a także na selektywnym pozyskaniu chromitu oraz fosforanów, które także są potencjalnymi źródłami (rudami) cennych metali.

10. Literatura

- Ayling B., Rose P., Petty S., Zemach E., Drakos P., 2012. – QEMSCAN® (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy): capability and application to fracture characterization in geothermal systems. *Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, January 30 – February 1, 2012. Vol. SGP-TR-194
- Badescu V., 2013. – *Asteroids. Prospective Energy and Material Resources*. Springer, New York
- Baer J., Chesley S., Matson R., 2011 - Astrometric masses of 26 asteroids and observations on asteroid porosity. *The Astronomical Journal*, Vol. 131 nr 5 s. 1-12
- Balasubramaniam R., Gokoglu S., Hegde U., 2010 – The reduction of lunar regolith by carbothermal processing using methane. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 96 (1-4), s. 54-61
- Binzel R.P., Reddy V., Dunn T., 2015 – The near-Earth object population: Connections to comets, main-belt asteroids, and meteorites. In *Asteroids IV* (red.: Michel P., DeMeo F., Bottke W.F.), str. 243-256, University of Arizona Press, Tucson
- Blaschke W., Witkowska-Kita B., Biel K., 2015 – Analiza możliwości pozyskiwania strategicznych surowców mineralnych. *Annual Set The Environment Protection. Rocznik Ochrony Środowiska*, Vol. 17 s. 1428-1448
- Blutstein K., Przylibski T., Łuszczek K., 2018 - Zawartość minerałów FeNi w chondrytach H jako wskaźnik zasobności pozaziemskich skał rudonośnych w wybrane metale. *Przegląd Geologiczny*, Vol. 66 nr 12 s. 776-784
- Blutstein K., Pawliszyn S., 2021 – Fe, Ni, Co, and Cu in FeNi alloys of H chondrites. *IOP Conference Series – Earth and Environmental Science*, Vol. 942, s. 012021
- Bolewski A., 1982 – *Mineralogia szczegółowa. Wydanie III*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa
- Burda J., 2014. – *Encyklopedia województwa śląskiego. Tom 1*. W: http://ibrbs.pl/mediawiki/index.php/Surowce_mineralne, dostęp: 10.09.2019
- Drzymała J., 2001. – *Podstawy mineralurgii*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
- Dunbar S.W., 2017 – Biotechnology and the Mine of Tomorrow. *Trends in Biotechnology*, Vol. 35, nr 1, p. 79-89
- Dunn T., Burbine T., Bottke W., Clark J., 2013 - Mineralogies and source regions of Near-Earth asteroids. *Icarus*, Vol. 222 s. 273-282
- Ebel D.S., Brunner C.E., Weisberg M.K., 2008 – Multiscale abundance and size distribution of inclusions in the allende CV3 meteorite by X-ray image analysis of slabs. *39th Lunar and Planetary Science Conference (Lunar and Planetary Science XXXIX), March 10-14, 2008 in League City, Texas*, No. 1391, s. 2121
- Ebihara M., Wolf R., Warren P., Anders E., 1992 – Trace Elements in 59 Mostly Highland Moon Rocks. *Proceedings of Lunar and Planetary Science*, 22: 417-426
- Eakle A.S., 1922 – Massive troilite from Del Norte County, California. *The American Mineralogist. Journal of the Mineralogical Society of America*, Vol. 7, nr 5, s. 77-80
- Eisele T.C., 2001 – Concentration of Useful Minerals from Asteroids. *Journal of the British Interplanetary Society*, Vol. 54 nr 7/8 s. 277-288

- Gaffey M., Bell J., Brown H., Burbine T., Piatek J., Reed K., Chaky D., 1993 - Mineralogical Variations within the S-Type Asteroid Class. *Icarus*, vol. 106, nr 2, s. 573-602
- Gaffey M., Gilbert S., 1998 - Asteroid 6 Hebe: The probable parent body of the H-type ordinary chondrites and the IIE iron meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 33, s. 1281-1295
- Gierlotka S., 2019. – Właściwości elektryczne i magnetyczne skał. *Energetyka*, nr 4, s. 325-328
- Grady M.M., Pratesi G., Moggi Cecchi V., 2014 – Atlas of meteorites. Cambridge University Press, Cambridge
- Kusiak M., Paszkowski M., 1998. – Wydzielanie minerałów ciężkich za pomocą separatora magnetohydrostatycznego. *Przegląd Geologiczny*, vol. 46, nr 8, s. 674-675
- Lomax B.A., Conti M., Khan N., Bennett N.S., Ganin A.Y., Symes M.D., 2020 – Proving the viability of an electrochemical proces for the simultaneous extraction of oxygen and production of metal alloys from lunar regolith. *Planetary and Space Science*, Vol. 180, p. 104748
- Łuszczek K., 2011 – Poszukiwanie nowych zasobów surowców w Układzie Słonecznym. *Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały* 40: 85-94
- Łuszczek K., 2021 – *Chondryty zwyczajne i ich ciała macierzyste*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
- Manecki A., 2004 – *Encyklopedia minerałów*. Uczelnianie Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków
- McSween H., Huss G., 2010 – *Cosmochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge
- Metzler K., Hezel D.C., Barosch J., Wölfer E., Schneider J.M., Hellmann J.L., Berndt J., Stracke A., Gattacceca J., Greenwood R.C., Franchi I.A., Burkhardt C., Kleine T., 2021 – The Loongana (CL) group of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 304, s. 1-31
- Meurisse A., Lomax B., Selmeçi Á., Conti M., Lindner R., Makaya A., Symes M.D., Carpenter J., 2022 – Lower temperature electrochemical reduction of lunar regolith simulants in molten salts. *Planetary and Space Science*, Vol. 211, s. 105408
- Noonan J.W., Reddy V., Harris W.M., Bottke W.F., Sanchez J.A., Furfaro R., Brown Z., Fernandes R., Kareta T., Lejoly C., Teja Nallapu R., Khan Niazi H., Slick L.R., Schatz L., Sharkey B.N.L., Springmann A., Angle G., Bailey L., Acuna D.D., Lewn C., Marchese K., Meshel M., Quintero N., Tatum K., Wilburn G., 2019 – Search for the H chondrite parent body among the three largest S-type asteroids: (3) Juno, (7) Iris, and (25) Phocaea. *The Astronomical Journal*, Vol. 158 nr 5, 213
- Przylibski T., 2015 – Górnicztwo pozaziemskie. *Meteoryt*, 3: 3-10
- Przylibski T., Łuszczek K., 2012 – Mineral resources of extraterrestrial bodies of the Solar System. *Mineralogia. Special Papers*, 40: 51-52
- Rasera J.N., Cilliers J.J., Lamany J.A., Hadler K., 2020 – The beneficiation of lunar regolith for space resource utilisation: A review. *Planetary and Space Science*, Vol. 186, s. 104879
- Rubin A.E., 1997 – Mineralogy of meteorite groups. *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 32 s. 231-247
- Rubin A.E., Ma C., 2017 – Meteoritic minerals and their origins. *Chemie der Erde*, Vol. 77, s. 325-385
- Ruzicka A., Grossman J.N., Garvie L., 2014 - The Meteoritical Bulletin, No. 100, 2014 June. *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 49, s. E1-E101

- Schwandt C., Hamilton J.A., Fray D.J., Crawford I.A., 2012 – The production of oxygen and metal from lunar regolith. *Planetary and Space Science*, Vol. 74 (1), s. 49-56
- Serway R., 1998 – *Principles of physics*. Saunders College Publishing, Fort Worth
- Tasker E., 2018 – *Fabryka planet*. Prószyński i S-ka, Warszawa
- Taylor S., McLennan S., 2009 – *Planetary crusts: their composition, origin and evolution*. Cambridge University Press, New York
- U.S. Geological Survey, 2017. *Mineral Commodity Summaries 2017*. USGS, Virginia
- Wasilewski G., 2018 – Evaluation of drilling-based water extraction methods for Martian ISRU from mid-latitude ice resources. *Planetary and Space Science*, Vol. 158, s. 16-24
- Wasilewski G., 2021 – Lunar thermal mining: Phase change interface movement, production decline and implications for systems engineering. *Planetary and Space Science*, Vol. 199, s. 105199
- Wedepohl K., 1995 – The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 59, No. 7: 1217-1232
- Weisberg M., McCoy T., Krot A., 2006 – Systematics and Evolution of Meteorite Classification W: Meteorites and the Early Solar System II (red. Lauretta D., McSween Jr.), The University of Arizona Press, Tucson
- Weisberg M., Smith C., Benedix G., Folco L., Righter K., Zipfel J., Yamaguchi A., Chennaoui Aoudjehane H., 2009 – The Meteoritical Bulletin, No. 95. *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 44, nr 3, s. 1-33
- Wiśniewski Ł., Wasilewski G., Kędziora B., Grygorczyk J., 2022 – Wybrane właściwości regolitu i ich istotny wpływ na realizację misji eksploracyjnych. *Acta Societatis Meteoriticae Polonorum*, Vol. 13, s. 107-119
- Wlotzka F., 1993 – A Weathering Scale for the Ordinary Chondrites. *Meteoritics*, Vol. 28, nr 3, s. 460
- Żbik M., 2020 – *Meteory i meteoryty*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa