

«ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΛΑΤΕΡΙΤΗ ΜΕ ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΡΑ Α. ΕΛΕΝΗ-ΜΑΡΙΑ



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΣΤΑΜΠΟΛΙΑΔΗΣ ΗΛΙΑΣ ΠΕΡΔΙΚΑΤΣΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΑΛΕΒΙΖΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Αναπληρωτής Καθηγητής, επιβλέπων) (Καθηγητής) (Επίκουρος Καθηγητής)

ΧΑΝΙΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2008 Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

«ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΛΑΤΕΡΙΤΗ ΜΕ ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ»

Διπλωματική εργασία

Παναγιωταρά Α. Ελένη-Μαρία

Εικόνα εξώφυλλου: Διάγραμμα ροής λατεριτικού σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος με χρήση προσομοιωτή εργοστασίων εμπλουτισμού μεταλλευμάτων (Modsim 3.5 Academic)

Χανιά 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείο Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθ. Η. Σταμπολιάδη. Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση εμπλουτισμού σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων της περιοχής Τριάδα Ευβοίας με φυσικές και χημικές διεργασίες.

Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του θέματος είναι ότι η ελληνική βιομηχανία νικελίου αποτελεί ένα από τους βασικότερους τομείς της ελληνικής βαριάς βιομηχανίας και συγχρόνως μια από τις πιο σημαντικές πλουτοπαραγωγικές μονάδες της εθνικής οικονομίας. Τα ελληνικά κοιτάσματα λατεριτικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων είναι γενικά πτωχά σε νικέλιο και υπάρχει αναζήτηση για νέες μεθόδους κατεργασίας έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος παραγωγής. Παράλληλα, το θέμα αυτό αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των θεωρητικών γνώσεων της φοίτησης μου στο τμήμα και των προβλημάτων που αντιμετωπίζονται στην πράξη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δε θα ήταν εφικτή χωρίς τη βοήθεια κάποιων ανθρώπων, οι οποίοι συνέβαλαν με την καθοδήγηση και την τεχνογνωσία τους, τόσο στη διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών και μετρήσεων όσο και στη σύνταξη της εργασίας αυτής.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Ηλία Σταμπολιάδη, για την καθοδήγησή του σε κάθε φάση της εξέλιξής της, για το αμέριστο ενδιαφέρον του για την πρόοδό της καθώς επίσης και για τις γνώσεις που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια μέσα από τις διαλέξεις των μαθημάτων του. Ένα μεγάλο ευχαριστώ απευθύνεται στον καθηγητή κ. Βασίλειο Περδικάτση, διευθυντή του εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το άτομο μου και για την αποδοχή του να αξιολογήσει την παρούσα εργασία. Επίσης, ευχαριστώ τον επίκουρο καθηγητή κ. Γεώργιο Αλεβίζο για την πολύτιμη βοήθεια του στη μικροσκοπική και ακτινοσκοπική εξέταση (XRD) των δειγμάτων μου και για τη συμβολή του στην περάτωση αυτής της εργασίας, αξιολογώντας την.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων, ιδιαίτερα την κ. Όλγα Παντελάκη για την απλόχερη παροχή κάθε βοήθειας και συμπαράσταση σε σημαντικά θέματα κατά τη διάρκεια της εκπόνησης και της συγγραφής της εργασίας αυτής. Δεν θα ήταν δυνατόν να παραλείψω να ευχαριστήσω την κ. Δέσποινα Πεντάρη και την κ. Άννα Κρητικάκη, η συνεισφορά των οποίων ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Γεώργιο Αποστολάκη για την παρασκευή των δειγμάτων, η οποία έγινε στο παρασκευαστήριο του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, την ΓΜΜ.Α.Ε ΛΑΡΚΟ για την αποστολή λατεριτικού υλικού με το οποίο εργάστηκα.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και την αδερφή μου για την διαρκή υποστήριξη και την αμέριστη συμπαράστασή τους, που επέτρεψαν την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου. Χωρίς τη δικιά τους βοήθεια οτιδήποτε έχω επιτύχει ως σήμερα θα ήταν ανέφικτο. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους μου για τα όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα της Εύβοιας είναι ετερόχθονου σχηματισμού που δημιουργήθηκαν από τη λατεριτίωση και μεταφορά των μητρικών υπερβασικών πετρωμάτων. Στο στάδιο της μεταφοράς και της απόθεσης τους, σχηματίστηκαν πισσόλιθοι αποτελούμενοι από συσσωματώματα αιματίτη, λειμωνίτη, χαλαζία και μαγνησιοπυριτικών ορυκτών που συνδέονται με μία συνδετική ύλη υπό μορφή τσιμέντου που είναι πλουσιότερη σε νικέλιο.

Στο μετάλλευμα υπάρχουν αποδεσμευμένοι κόκκοι ασβεστίτη που είτε εναποτέθηκαν δευτερογενώς κατά τον σχηματισμό ή αναμίχθηκαν κατά την εξόρυξη του μεταλλεύματος. Σκοπός της εργασίας, σε πρώτο στάδιο, είναι η απομάκρυνση τυχόν αποδεσμευμένων κόκκων ασβεστίτη και χαλαζία ώστε να πάρουμε ένα προσυμπύκνωμα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για το στάδιο αυτό είναι ο μαγνητικός διαχωρισμός. Αν και η μέθοδος δουλεύει καλά, εντούτοις δεν ενδείκνυται η χρήση του για το συγκεκριμένο μετάλλευμα γιατί το ποσοστό των απομακρυσμένων στείρων (ασβεστίτη και χαλαζία) είναι μικρό.

Σε δεύτερο στάδιο, προσπαθήσαμε να πετύχουμε εκλεκτική θραύση της συνδετικής ύλης από τους ολόκληρους κόκκους που συνυπάρχουν στα συσσωματώματα των πισσολίθων. Στην παρούσα εργασία φαίνεται να υπάρχει η τάση της εκλεκτικής θραύσης, με αποτέλεσμα τα ψιλά -106μm να είναι πλουσιότερα από τα χονδρά +106μm. Έτσι, έγιναν διαδοχικές θραύσεις μέχρι το μέγιστο μέγεθος κόκκων να γίνει -710μm.

Τα πλούσια ψιλά (-106μm) της θραύσης συσσωματώθηκαν έτσι ώστε να προκύψουν μεγαλύτερου μεγέθους κόκκοι οι οποίοι θα μπορούν να τροφοδοτήσουν το υπάρχον εργοστάσιο πυρομεταλλουργίας. Η επίδραση των διαφορετικών συνδετικών στη συσσωμάτωση μελετήθηκε με τη δημιουργία ράβδων, οι οποίοι ψήθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες και μετρήθηκε η αντοχή τους. Από αυτή την εργαστηριακή μελέτη προέκυψε ότι το υλικό είχε μεγαλύτερη αντοχή με την προσθήκη μπεντονίτη από ότι με τσιμέντο. Τέλος, το χονδρό κλάσμα της θραύσης +106μm -710μm υπέστη εκχύλιση με θειικό οξύ. Η ανάκτηση του νικελίου (Ni) φθάνει το 55%, ενώ αυτή του σιδήρου (Fe) και αργιλίου (Al) μένει σε μικρά επίπεδα, επιτυγχάνοντας έτσι εκλεκτική διαλυτοποίηση. Με τη διαδικασία που περιγράφηκε, το πλούσιο μέρος του υλικού θα χρησιμοποιηθεί στην πυρομεταλλουργία ενώ το πτωχό στην υδρομεταλλουργία. Η διαδικασία αυτή είναι πιο επιτυχής όσο πιο εκλεκτική είναι η αρχική θραύση. Πιστεύεται ότι αυτό θα επιτευχθεί με υγρή λειοτρίβηση, πράγμα που αποφεύχθηκε γιατί σε αυτή την περίπτωση θα έπρεπε κανείς να λύσει και τα προβλήματα διαχωρισμού των στερεών από το νερό και το υψηλό ποσοστό υγρασίας του ψιλού προϊόντος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ПЕРІЛНҰН	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ	X
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΝΙΚΕΛΙΟ - ΣΙΔΗΡΟΝΙΚΕΛΙΟΥΧΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ	3
2.1 Γενικά στοιχεία για το νικέλιο	
2.2 Τιμή νικελίου	4
2.3 Χρήσεις νικελίου	5
2.4 Τύποι σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων	7
2.4.1 Θειούχα μεταλλεύματα	7
2.4.2 Λατεριτικά κοιτάσματα	7
2.5 Κοίτασματα μεταλλεύματος λατερίτη στον Νομό Ευβοίας	
2.6 Μεταλλουργικές μέθοδοι παραγωγής σιδηρονικελίου από λατερίτη	10
2.6.1 Προϊόντα της εταιρίας ΛΑΡΚΟ	11
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ	12
3.1 Θραύση	
3.2 Δειοτρίβηση	14
3.3 Μαγνητικός διαχωρισμός	16
3.4 Ταξινόμηση μεγέθους με υδροταξινομητή	
3.4.1 Σύστημα ταξινόμησης με υδροταξινομητή Warman	
3.5 Μορφοποίηση δοκιμίων	
3.6 Εκχύλιση	24

3.7 Φασματομετρία ατομικής απορρόφησης	25
3.7.1 Χημική ανάλυση δείγματος	
3.8 Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ	
3.8.1 Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος	
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	
4.1 Προέλευση	
4.2 Κοκκομετρία	
4.3 Ορυκτολογική ανάλυση	
4.3.1 Παρατηρήσεις στιλπνών τομών με χρήση μεταλλογραφικού μικρο	σκοπίου 33
4.3.2 Συμπεράσματα και προτάσεις από τη μικροσκοπική ανάλυση	
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	
5.1 Μαγνητικός διαχωρισμός	
5.1.1 Συμπεράσματα μαγνητικού διαχωρισμού	
5.2 Ταξινόμηση λεπτόκοκκου υλικού με υδροταξινομητή Warman	
5.2.1 Συμπεράσματα υδροταξινόνησης με σύστημα κυκλώνων	51
5.3 Διαδοχική θραύση	
5.3.1 Συμπεράσματα διαδοχικής θραύσης	
5.4 Μορφοποίηση λεπτόκοκκου υλικού	59
5.4.1 Συμπεράσματα μορφοποίησης	60
5.5 Εκχύλιση	61
5.5.1 Συμπεράσματα εκχύλισης	64
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	65
6.1 Ανακεφαλαίωση	65
6.2 Συμπεράσματα δοκιμών εμπλουτισμού	
6.3 Προτάσεις	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69
Ελληνική	69
Διεθνής	70
ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ	71

ПАРАРТНМА	
1. Ακτινοδιαγράμματα από περιθλασίμετρο	
2. Ταξινόμηση υλικού	75

KATAΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

2.1	Νικέλιο	3
2.2	Τιμές νικελίου κατά την τελευταία πενταετία	4
2.3	Αποθέματα νικελίου κατά την τελευταία πενταετία	5
2.4	Χρήσεις νικελίου	6
2.5	Εφαρμογές νικελίου	6
2.6	Σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα στην Ελλάδα	8
2.7	Στρωματογραφική σειρά υποπελαγωνικής ζώνης	9
2.8	Παραγωγή σιδηρονικελίου από σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα όπως	
	γίνεται στο εργοστάσιο της ΛΑΡΚΟ (Λάρυμνα Φθιώτιδας)	11
3.1	Σχηματική διάταξη σιαγονωτού σπαστήρα	13
3.2	Σχηματική διάταξη κωνικού σπαστήρα	13
3.3	α) Κίνηση φορτίου εντός περιστρεφόμενου μύλου	14
	β) Δυνάμεις που ασκούνται στα μέσα λειοτρίβησης	14
3.4	Ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής	17
3.5	Ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής του εργαστηρίου εμπλουτισμού	
	μεταλλευμάτων	17
3.6	Μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης του εργαστηρίου	
	εμπλουτισμού μεταλλευμάτων	18
3.7	Υδροταξινομητής Warman	20
3.8	Αναμικτήριο τύπου Ζ-BLADE	21
3.9	Εξωθητής εμβόλιμης ροής	
3.10	Σχηματική διάταξη της δοκιμής αντοχή σε κάμψη	23
3.11	Διάταξη φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης	25
3.12	Διάταξη κυλινδρικής λυχνίας	26
4.1	Κλάσμα -0.106mm	33
4.2	Πολύ μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm	34
4.3	Ενδιάμεσα μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm	
4.4	Μη μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm	36

4.5	Πολύ μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm	36
4.6	Ενδιάμεσα μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm	37
4.7	Μη μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm	38
4.8	Κλάσμα 30.8μm από τον υδροταξινομητή warman	39
4.9	Κλάσμα 23μm	40
4.10	Κλάσμα 16.7μm	40
4.11	Κλάσμα 12μm	41
4.12	Κλάσμα 10.1μm	41
5.1	Ποσοστό Νi συναρτήσει της κοκκομετρίας των κλασμάτων	49
5.2	Διαδοχική θραύση	53
5.3	Δοκιμές θραύσης	56
5.4	Αθροιστικές αναλύσεις Νi % για τα ψιλά και τα χονδρά	56
5.5	Αθροιστική ανάκτηση Νi% των ψιλών και των χονδρών	57
5.6	Σχέση ανάλυσης και ανάκτησης για τα ψιλά και τα χονδρά	57
5.7	Αντοχή υλικού με διάφορα συνδετικά συναρτήσει της θερμοκρασίας	60
5.8	Συγκέντρωση στοιχείων στο διήθημα συναρτήσει του χρόνου	62
5.9	Ανάκτηση των στοιχείων συναρτήσει του χρόνου	62
5.10	Εκχύλιση των κλασμάτων +0.106mm και -0.106mm του μεταλλεύματος	63
1	Ακτινοδιάγραμμα του κλάσματος -0.106mm	72
2	Ακτινοδιάγραμμα του πολύ μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +0.3 -1mm.	72
3	Ακτινοδιάγραμμα του ενδιάμεσα μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +0.3	
	-1mm	73
4	Ακτινοδιάγραμμα του μη μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +0.3 -1mm	73
5	Ακτινοδιάγραμμα του πολύ μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +2.8 -6mm.	74
6	Ακτινοδιάγραμμα του ενδιάμεσα μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +2.8	
	-6mm	74
7	Ακτινοδιάγραμμα του μη μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +2.8 -6mm	75

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

4.1	Κοκκομετρική κατανομή με αντίστοιχες χημικές αναλύσεις	31
4.2	Οριακές και πραγματικές τιμές διαμέτρων των κλασμάτων με τα	
	αντίστοιχα βάρη τους	32
5.1	Κοκκομετρικά κλάσματα με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις τους	44
5.2	Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις	
	τις μεταλλομονάδες και την κατανομή επί του κλάσματος	45
5.3	Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με τις αντίστοιχες χημικές	
	αναλύσεις, τις μεταλλομονάδες και την κατανομή επί του αρχικού δείγματος	46
5.4	Αθροιστικά αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με τις αντίστοιχες χημικέ	
	αναλύσεις, τις μεταλλομονάδες και την κατανομή επί του κλάσματος	47
5.5	Αθροιστικά αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με τις αντίστοιχες χημικέ	
	αναλύσεις, τις μεταλλομονάδες και την κατανομή επί του αρχικού δείγματος	48
5.6	Οριακές και πραγματικές τιμές διαμέτρων των κλασμάτων με τα	
	αντίστοιχα βάρη τους	51
5.7	Κοκκομετρική κατανομή κλασμάτων με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις	
	(δείγμα ΛΑΡΚΟ)	52
5.8	Διαδοχική θραύση και ταξινόμηση μεγέθους	54
5.9	Χημικές αναλύσεις των ψιλών κλασμάτων από τα επιμέρους τμήματα της	
	διαδοχικής θραύσης	54
5.10	Αθροιστικές μεταλλομονάδες, κατανομή και χημικές αναλύσεις για τα ψιλά	
	και τα χονδρά κάθε κλάσματος	55
5.11	Αντοχή υλικού με προσθήκη συνδετικού συναρτήσει της θερμοκρασίας	59
5.12	Χημικές αναλύσεις του κλάσματος +0.106-0.710mm με τις αντίστοιχες	
	ανακτήσεις συναρτήσει του χρόνου	61
5.13	Χημικές αναλύσεις των κλασμάτων +0.106 -0.710mm και -0.106mm με τις	
	αντίστοιχες ανακτήσεις τους συναρτήσει του χρόνου	63

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής, είναι η εργαστηριακή διερεύνηση εμπλουτισμού λατεριτικού μεταλλεύματος με φυσικές και χημικές διεργασίες. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα λατερίτη της περιοχής Τριάδας της Κεντρικής Ευβοίας.

Στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η ανάκτηση ενός ικανοποιητικού συμπυκνώματος, πλούσιο σε νικέλιο, με την εφαρμογή φυσικών και χημικών μεθόδων εμπλουτισμού.

Οι μέθοδοι του εμπλουτισμού που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη του παραπάνω στόχου είναι ο μαγνητικός διαχωρισμός, η διαδοχική θραύση (θραύση, λειοτρίβηση σε ραβδόμυλο, λειοτρίβηση σε σφαιρόμυλο) και η εκχύλιση. Ακόμα, πραγματοποιήθηκε υδροταξινόμηση του λεπτόκοκκου λατεριτικού υλικού με σύστημα κυκλώνων της warman και έπειτα μορφοποίηση του, έτσι ώστε να εξεταστούν οι μηχανικές του ιδιότητες.

Ο μαγνητικός διαχωρισμός αποσκοπεί στον διαχωρισμό των ορυκτών του μεταλλεύματος ανάλογα με τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Έτσι, ανάλογα με τη συμπεριφορά των διαφόρων ορυκτών μέσα στο μαγνητικό πεδίο του μαγνητικού διαχωρίζεται σε μαγνητικό και μη μαγνητικό.

Η διαδοχική θραύση, που περιελάμβανε τη θραύση και έπειτα τη λειοτρίβηση του μεταλλεύματος, αποσκοπεί στην ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων του σε μεγέθη κατάλληλα προς εμπλουτισμό. Η διαδικασία της κατάτμησης εφαρμόζεται συνήθως σε όλες τις μεθόδους εμπλουτισμού, ως πρωταρχική διεργασία, για να επιτευχθεί η αποδέσμευση του μεταλλεύματος από τα στείρα, και η δημιουργία κατάλληλων κοκκομετρικών κλασμάτων.

Ο στόχος της εκχύλισης είναι η ανάκτηση του νικελίου από πτωχά μεταλλεύματα.

Η υδροταξινόμηση με σύστημα κυκλώνων της warman, αποσκοπεί στο διαχωρισμό του πολύ λεπτόκοκκου υλικού (μεγέθους μερικών μm) από το μετάλλευμα. Το λεπτόκοκκο αυτό υλικό είναι δύσκολο να εμπλουτιστεί περαιτέρω, αν και είναι αρκετά πλούσιο σε νικέλιο. Για το λόγο αυτό προτάθηκε να μορφοποιηθεί αυτό το υλικό.

Η μορφοποίηση του λεπτόκοκκου υλικού είχε σκοπό τη συσσωμάτωση του και τη δημιουργία δοκιμίων σχήματος ράβδων, έτσι ώστε να μπορούν να εξεταστούν οι μηχανικές του ιδιότητες.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών εμπλουτισμού, θα συμβάλλει στην επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεταξύ των μεθόδων, ώστε να επιτευχθεί η ανάκτηση ενός συμπυκνώματος με ικανοποιητική περιεκτικότητα σε νικέλιο.

Στην εργασία περιγράφονται αρχικά διάφορα θεωρητικά στοιχεία, όπως γενικά για το νικέλιο, για την τιμή και τις χρήσεις του, για τους τύπους των σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων, γεωλογικά στοιχεία του κοιτάσματος λατερίτη της Τριάδας Ευβοίας, καθώς και για την μεταλλουργία και τα προϊόντα που παράγονται από την καμίνευση λατεριτικών μεταλλευμάτων στην Ελλάδα.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή του δείγματος, όπου αναφέρεται στην προέλευσή, την κοκκομετρία και την ορυκτολογική εξέτασή του. Τέλος, υπάρχει η περιγραφή και ανάλυση της εργαστηριακής μελέτης, όπου παρουσιάζονται οι διάφορες εργαστηριακές δοκιμές εμπλουτισμού του μεταλλεύματος με τα αποτελέσματα και την αξιολόγησή τους.

2. ΝΙΚΕΛΙΟ - ΣΙΔΗΡΟΝΙΚΕΛΙΟΥΧΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

2.1 Γενικά στοιχεία για το νικέλιο

Το νικέλιο (Ni) ως χημικό στοιχείο έχει ατομικό αριθμό z=28, ατομικό βάρος 58.6934, σημείο τήξης 1450 °C και σημείο ζέσεως 2150 °C. Έχει πυκνότητα (σε στερεή μορφή) 8908kg/m³ και μοριακό όγκο 6.59cm³. Το νικέλιο ως μέταλλο είναι στρατηγικής σημασίας, λόγω της περιορισμένης προσφοράς και της μεγάλης ζήτησης. Ανακαλύφθηκε από τον Axel Fredirik Cronstedt το 1751 και παράχθηκε από τον Bergman το 1775 κατά την κατεργασία σουηδικών μεταλλευμάτων κοβαλτίου. Λεπτομερής μελέτη των ιδιοτήτων του έγινε το 1804 από τον Richter [7].

Το Ni έχει χρώμα αργυρόλευκο και κάτω από τους 385 βαθμούς είναι ελαφρώς μαγνητικό μέταλλο. Έχει σκληρότητα 7.12 κατά Mohs και είναι παρόμοια με αυτή του σιδήρου ή και σκληρότερο. Επίσης είναι ελατό και όλκιμο, ανθεκτικότερο του σιδήρου και αμετάβλητο στον αέρα ως συμπαγές. Είναι καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού και συγκεκριμένα έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0.142cal/cm/cm²/sec/°C και ηλεκτρική αγωγιμότητα 16 (Cu=100%). Στιλβωμένο παίρνει λαμπρή όψη. Διαλύεται στο νιτρικό οξύ, ενώ στο υδροχλωρικό οξύ διαλύεται αργά και "εν βρασμώ" [a].



Σχήμα 2.1: Νικέλιο

2.2 Τιμή νικελίου

Το Νικέλιο είναι χρηματιστηριακό προϊόν και η τιμή του διαμορφώνεται διεθνώς στις αγορές προϊόντων. Οδηγούμενη από την περιορισμένη προσφορά σε ένα περιβάλλον εκρηκτικής ζήτησης η τιμή του στις διεθνείς αγορές παρουσίασε κατακόρυφη άνοδο κατά το 2007. Η διαφορά από το 2001 ως το 2007 είναι της τάξης του 670% (Σχήμα 2.2). Συγκεκριμένα, στις 5 Απριλίου 2007, το νικέλιο έφτασε στα 49.500 δολάρια/τόνος στο Λονδίνο, τιμή ρεκόρ όλων των εποχών [b].

Παρόλα αυτά, η αύξηση των αποθεμάτων (σχεδόν εξαπλασιάστηκαν φέτος) (Σχήμα 2.3) και η επιβράδυνση της ζήτησης λόγω της κρίσης στην αγορά στεγαστικών δανείων των ΗΠΑ είναι οι παράγοντες που κρίνεται πως θα ωθήσουν την τιμή του νικελίου κατά μέσο όρο στα 29.500 δολάρια ο μετρικός τόνος (13,4 δολάρια η lb), στο Λονδίνο. Η τιμή αυτή είναι 21% χαμηλότερη από τον φετινό μέσο όρο και 46% έναντι του ρεκόρ που καταγράφηκε τον Μάιο. Το νικέλιο παρουσίασε φέτος τις δεύτερες χειρότερες επιδόσεις μεταξύ των έξι μετάλλων που διαπραγματεύονται στην αγορά του Λονδίνου [c].



Σχήμα 2.2: Τιμές νικελίου κατά την τελευταία πενταετία [d]



Σχήμα 2.3: Αποθέματα νικελίου κατά την τελευταία πενταετία [d]

2.3 Χρήσεις νικελίου

Οι χρήσεις του νικελίου προέρχονται από τις χαρακτηριστικές του ιδιότητες, όπως αντίσταση στη διάβρωση, ευπλαστότητα και αντοχή. Έτσι, μεγάλες ποσότητες νικελίου χρησιμοποιούνται για την παρασκευή νικελιοχάλυβων, οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή σιδηρών γεφυρών, καλωδίων, οπλισμού προεντεταμένου σκυροδέματος κ.λπ. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.4), η κυριότερη χρήση του είναι η παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα και το μεγαλύτερο κομμάτι της παραγωγής καταναλώνεται στη δημιουργία κραμάτων (υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο, χαλυβο-κράματα κατασκευών, χυτοσιδήρου και χάλυβα, χαλκού και ορειχάλκου).

Το νικέλιο χρησιμοποιείται ευρέως στην επινικέλωση, δηλαδή ως προστατευτική επικάλυψη επιφανειών μετάλλων ή κραμάτων, λόγω της αυξημένης αντοχής του στη διάβρωση, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί τη λαμπρότητά του. Το ανθρακικό νικέλιο χρησιμοποιείται στις επινικελώσεις και στην παρασκευή χρωμάτων κεραμικών και κραμάτων [4].

Ακόμα, χρησιμοποιείται στη βιομηχανία αεροπλάνων, στις βιομηχανίες ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών ειδών, στην κατασκευή τουρμπίνων, σωλήνων ελαίου

και φωταερίου, γεωργικών μηχανημάτων, πορσελάνης, στην κατασκευή νομισμάτων, μπαταριών, καταλυτών, στην υαλουργία, κλπ. (Σχήμα 2.5)



Σχήμα 2.4: Χρήσεις νικελίου [f]



Σχήμα 2.5: Εφαρμογές νικελίου

2.4 Τύποι σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων

Στη φύση συναντώνται δύο τύποι μεταλλευμάτων νικελίου, τα θειούχα και τα λατεριτικά [7].

2.4.1 Θειούχα μεταλλεύματα

Το βασικό ορυκτό στα μαγματικά θειούχα μεταλλεύματα είναι ο πεντλανδίτης (NiS.FeS μέχρι NiS.2FeS) και σε μικρότερο βαθμό ο νικελιούχος πυρροτίτης (στερεό διάλυμα Ni μέσα σε Fe_nS_{n+1}). Άλλα ορυκτά, όπως ο μιλλερίτης (NiS) είναι περιορισμένης σημασίας. Μαζί με τα παραπάνω ορυκτά-σύνδρομα νικελίου συνυπάρχουν πάντοτε ορυκτά χαλκού, κοβαλτίου κ.α. Τα θειούχα μεταλλεύματα έχουν περιεκτικότητα σε Ni περίπου 1%.

Από τα θειούχα μεταλλεύματα απομακρύνονται με τη μέθοδο της επίπλευσης τα σύνδρομα, αποτελούμενα κυρίως από μαγνητίτη και διάφορες πυριτικές ενώσεις του σιδήρου, μαγνησίου, αργιλίου. Έτσι προκύπτει μικτό συμπύκνωμα πεντλανδίτηχαλκοπυρίτη στο οποίο συγκεντρώνονται τα προαναφερθέντα χρήσιμα ορυκτά. Το συμπύκνωμα αυτό διαχωρίζεται με διαφορική επίπλευση σε ένα συμπύκνωμα νικελίου (πεντλανδίτη) και ένα συμπύκνωμα χαλκού (χαλκοπυρίτη).

2.4.2 Λατεριτικά κοιτάσματα

Τα οξειδωμένα σιδηρομεταλλεύματα που προέρχονται από τη λατεριτική αποσάθρωση μητρικών υπερβασικών πετρωμάτων, με μικρό ποσοστό Ni (περιέχουν συνήθως 1-3% Ni), ονομάζονται λατερίτες. Το Ni συμμετέχει κυρίως εντός των σύνθετων πυριτικών αλάτων νικελίου-μαγνησίου αλλά και στα οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου. Κατά συνέπεια, λόγω της φύσεως τους, τα μεταλλεύματα των λατεριτών είναι πολύ δύσκολο να εμπλουτιστούν σημαντικά και έτσι αποστέλλονται ελαφρώς αναβαθμισμένα στη μεταλλουργία. Τα 2/3 των παγκόσμιων αποθεμάτων Ni βρίσκονται σε λατερίτες [8].

2.5 Κοίτασματα μεταλλεύματος λατερίτη στον Νομό Ευβοίας

Τα κοιτάσματα μεταλλεύματος λατερίτη βρίσκονται σε διάφορα σημεία της Ελλάδας, όπως στον Νομό Ευβοίας, στον Άγιο Ιωάννη Λάρυμνας και στην Καστοριά (Σχήμα 2.6). Το δείγμα στο οποίο αναφέρεται η συγκεκριμένη εργασία αφορά τα κοιτάσματα του νομού Ευβοίας και συγκεκριμένα του εργοταξίου της Τριάδας.



Σχήμα 2.6: Σιδηρονικελιούχα λατεριτικά κοιτάσματα στην Ελλάδα

Από γεωλογικής πλευράς, η περιοχή ανήκει στην Υποπελαγονική ζώνη της Ανατολικής Ελλάδας. Κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της ζώνης αυτής είναι η παρουσία των οφιολίθων, σχιστοκερατολίθων και η Κενομάνια επίκλυση με την οποία συνδέονται τα γνωστά σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα.

Οι δημιουργηθέντες στην περιοχή γεωλογικοί σχηματισμοί από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους είναι (Σχήμα 2.7):

- Οφιόλιθοι κατά το πλείστον σερπεντινιωμένοι
- Πυριτόλιθοι στη βάση του μεταλλεύματος
- Νικελιούχο σιδηρομετάλλευμα
- Ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι

- Σενώνιοι ασβεστόλιθοι
- Νεογενείς τεταρτογενείς αποθέσεις



Σχήμα 2.7: Στρωματογραφική σειρά υποπελαγωνικής ζώνης

Το κοίτασμα αναπτύσσεται σε συμφωνία στρώσης κάτω από τους ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και υπέρκειται ασύμφωνα των οφιολίθων. Η γενική διεύθυνση - παράταξη του κοιτάσματος είναι ΒΑ - ΝΔ και η κλίση 0° - 30° προς νοτιοδυτικά. Σε ορισμένες περιοχές του κοιτάσματος η στρωματογραφική σειρά διαταράσσεται από ρήγματα και εφιππεύσεις με συνέπεια τη διακοπή ή επανάληψη της μεταλλοφορίας αντίστοιχα. Το κατακόρυφο πάχος του κοιτάσματος κυμαίνεται από 1 έως 45m με μέσο όρο 15m. Το μετάλλευμα είναι κυρίως πισσολιθικό, εύθρυπτο έως συμπαγές με μικρά πυριτολιθικά τεμαχίδια.

Μέχρι το 2002 στο κοίτασμα της Τριάδας (Ισωμα) είχαν εξορυχθεί 7.097.082ton μεταλλεύματος και 44.849.410ton στείρων. Τα γεωλογικά αποθέματα μεταλλεύματος ήταν 7.360.000ton, ενώ τα εκμεταλλεύσιμα ήταν 6.905.513ton, ποιότητας 0,824% Νί επί ξηρού και σχέσης Αποκάλυψης 2,866m³ In situ στείρων/ton μεταλλεύματος. Τα σιδηρονικελιούχα αποθέματα της Εύβοιας γενικότερα ξεπερνούν τα 200 εκατομμύρια τόνους, ενώ εξ αυτών το 15% θεωρείται σήμερα ως βέβαιο εκμεταλλεύσιμο απόθεμα. Η ετήσια παραγωγή μεταλλεύματος φτάνει περίπου τους 1.500.000 τόνους στο εργοτάξιο της Τριάδας.

2.6 Μεταλλουργικές μέθοδοι παραγωγής σιδηρονικελίου από λατερίτη

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην Ελλάδα είναι η Mousoulos-Larco, η οποία εφαρμόζεται στις εγκαταστάσεις της ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ στην περιοχή Λοκρίδας Ευβοίας, με σκοπό την αξιοποίηση των ελληνικών λατεριτικών κοιτασμάτων. Πρόκειται για πυρομεταλλουργική κατεργασία, βάση της οποίας αποτελεί η εκλεκτική αναγωγή του μεταλλεύματος (Σχήμα 2.8).

Το μετάλλευμα θραύεται και αναμειγνύεται με συγκεκριμένη ποσότητα στερεού καυσίμου (λιγνίτης, γαιάνθρακας). Οδηγείται σε περιστροφικό κλίβανο, όπου υποβάλλεται σε ελεγχόμενη ανθρακοθερμική αναγωγή, μια προαναγωγή ουσιαστικά των οξειδίων Νἱ καθώς επίσης και μέρος των οξειδίων του σιδήρου. Στην έξοδο του κλίβανου υπάρχει καυστήρας μαζούτ, με σκοπό την υποβοήθηση της θέρμανσης του μεταλλεύματος, ενώ στα πλάγια της καμίνου υπάρχουν φυσητήρες, από όπου τροφοδοτείται αέρας. Η θερμοκρασία του μεταλλεύματος φτάνει τους 850-900°C. Τα καυσαέρια της καμίνου παρασύρουν λεπτή σκόνη, η οποία συλλέγεται σε φίλτρα και κατόπιν μορφοποιείται σε pellets τα οποία ανακυκλώνονται στην περιστροφική κάμινο.

Το προϊόν των περιστροφικών καμίνων στη συνέχεια υποβάλλεται σε μία επιπλέον αναγωγή οξειδίων του νικελίου και του σιδήρου σε ηλεκτρικές καμίνους αναγωγικής τήξης, όπου μεταφέρεται από την περιστροφική κάμινο μέσω κάδων γερανογεφυρών. Από εκεί παραλαμβάνεται σιδηρονικελιούχο προϊόν και σκωρία. Το σιδηρονικελιούχο προϊόν έχει θερμοκρασία 1500 °C και περιεκτικότητα 14% σε Ni. Η σκωρία αποβάλλεται με θερμοκρασία 1400 °C, ψύχεται και συγχρόνως σφαιροποιείται.

Το σιδηρονικελιούχο προϊόν στη συνέχεια οδηγείται σε μεταλλάκτες, όπου γίνεται εμπλουτισμός του σιδηρονικελίου και ταυτόχρονα καθαρίζεται από θείο και φώσφορο. Με εμφύσηση οξυγόνου – προπανίου, μέρος του σιδήρου φεύγει ως σκωρία, με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του μίγματος σε Νi. Η σκωρία που παράγεται εδώ από απόχυση και ψύξη θραύεται, με σκοπό την ανάκτηση του μηχανικώς παρασυρόμενου μετάλλου έπειτα από μαγνητικό διαχωρισμό. Η μεταλλική φάση που παράγεται στους μεταλλάκτες είναι σε μέγεθος 3-35mm και αποτελεί το τελικό προϊόν προς πώληση, με περιεκτικότητα σε Ni 20-25%, ανάλογα με τις ζητούμενες προδιαγραφές.



Σχήμα 2.8: Παραγωγή σιδηρονικελίου από σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα όπως γίνεται στο εργοστάσιο της ΛΑΡΚΟ (Λάρυμνα Φθιώτιδας) [g]

2.6.1 Προϊόντα της εταιρίας ΛΑΡΚΟ

Τα προϊόντα που παράγει η εταιρία ΛΑΡΚΟ από την καμίνευση των ελληνικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων είναι:

- Κονιοποιημένο σιδηρονικέλιο με περιεκτικότητα σε νικέλιο 18-20%, παραγωγής μεταλλακτών οξυγόνου, ελεύθερο άνθρακα χαμηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο. Πρώτη ύλη παραγωγής ανοξείδωτου χάλυβα [2].
- Σκουριά ηλεκτροκαμίνων αναγωγής κοκκοποιημένη πρώτη ύλη για την τσιμεντοβιομηχανία, υλικό αμμοβολής και επίστρωση δρόμων.
- Σκουριά μεταλλακτών θρυμματισμένη, άριστο υλικό για βαρύ σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται στην πάκτωση αντλητικών νησίδων πετρελαίου, σαν περίβλημα υποθαλάσσιων αγωγών κ.α.
- Το τελικό προϊόν της είναι FeNi το οποίο εξάγεται σε ευρωπαϊκές χαλυβουργίες ανοξείδωτου χάλυβα και αξιολογείται ως άριστο προϊόν για την παραγωγή ωστενικού ανοξείδωτου χάλυβα, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε C%, S% και P%.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

3.1 Θραύση

Η θραύση περιλαμβάνει τα στάδια της κατάτμησης από το αρχικό μέγεθος μέχρι περίπου 10mm έως 2mm. Σκοπός της πρωτογενούς θραύσης είναι η ελάττωση του μεγέθους του εξορυσσόμενου υλικού που μπορεί να περιέχει όγκους μέχρι και ένα μέτρο, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί με μεταφορικές ταινίες. Στα επόμενα στάδια η κατάτμηση εξυπηρετεί τις προδιαγραφές χρήσης του προϊόντος, τις απαιτήσεις της διαδικασίας που ενδεχομένως ακολουθεί και τις ανάγκες αποδέσμευσης του υλικού. Όταν πρόκειται για μετάλλευμα που προορίζεται να υποστεί μια διαδικασία για τον διαχωρισμό του χρήσιμου από το άχρηστο ορυκτό, θα πρέπει το μέγεθος να είναι τέτοιο ώστε να μην συνυπάρχουν το χρήσιμο με τα άχρηστα ορυκτά στον ίδιο κόκκο.

Για να σπάσουμε ένα σώμα πρέπει να καταβάλουμε δυνάμεις που να υπερβαίνουν τις δυνάμεις συνοχής του υλικού αυτού. Οι κυριότερες κατηγορίες δυνάμεων που εξασκούν οι μηχανές κατάτμησης είναι οι ακόλουθες:

- Θλίψη: Είναι η συνηθέστερη μορφή δύναμης που χρησιμοποιείται στην κατάτμηση και εφαρμόζεται δια της συμπίεσης των σωμάτων μεταξύ δύο επιφανειών. Η πίεση εξασκείται από τη μια επιφάνεια ενώ η άλλη μένει ακίνητη. Οι κυριότεροι τύποι μηχανών κατάτμησης με θλίψη είναι οι σιαγονωτοί σπαστήρες, οι γυροσκοπικοί και οι κωνικοί σπαστήρες.
- Κρούση: είναι η απλούστερη δύναμη κατάτμησης και εξασκείται με την απότομη πρόσκρουση τεμαχίου επί ταχέως κινούμενης επιφάνειας ή αντιστρόφως, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του τεμαχίου. Οι κυριότερες μηχανές κατάτμησης με κρούση είναι οι κρουστικοί περιστροφικοί σπαστήρες και εν μέρει οι σφυρόμυλοι, οι ραβδόμυλοι, οι σφαιρόμυλοι και οι μύλοι αυτογενούς λειοτρίβησης.
- Τριβή: είναι η δύναμη κατάτμησης που εφαρμόζεται όταν το υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων και αντιθέτως κινούμενων επιφανειών που δημιουργούν διατμητικές τάσεις μέσα στο σώμα και ολίσθηση σε εσωτερικές επιφάνειες του σώματος. Ο σφυρόμυλος θεωρείται ως η κυριότερη μηχανή

κατάτμησης με τριβή. Άλλες τέτοιες μηχανές είναι οι σφαιρόμυλοι και οι ραβδόμυλοι.

 Διάτμηση: είναι κυρίως εφελκυστική δύναμη και έχει περιορισμένη εφαρμογή στην κατάτμηση και εν μέρει παρατηρείται στους σφυρόμυλους και τους οδοντωτούς κυλινδρόμυλους.

Οι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τις ανάγκες της θραύσης του υλικού ήταν ο σιαγονωτός σπαστήρας (Σχήμα 3.1) και έπειτα, για περεταίρω θραύση, ο κωνικός σπαστήρας (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.1: Σχηματική διάταξη σιαγονωτού σπαστήρα [10]



Σχήμα 3.2: Σχηματική διάταξη κωνικού σπαστήρα [10]

3.2 Λειοτρίβηση

Η λειοτρίβηση διενεργείται εντός μηχανών, όπως είναι ο ραβδόμυλος και ο σφαιρόμυλος που στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Λειοτριβούν το μετάλλευμα δια πτώσεως και κυλίσεως των μέσων λειοτρίβησης που περιέχουν. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό κέλυφος που στηρίζεται στα δύο άκρα και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Μέσα στο κέλυφος υπάρχει ένα μόνιμο φορτίο από μεταλλικές ράβδους ή σφαίρες ή και κροκάλες, που βρίσκονται σε συνεχή κίνηση λόγω της περιστροφής του κελύφους του μύλου [10].

Κατά την περιστροφή του μύλου οι μεταλλικές ράβδοι ή τα άλλα μέσα λειοτρίβησης είτε ανυψώνονται μέχρι που πολλές από αυτές αρχίζουν να κυλίονται πάνω στις άλλες, είτε ανυψώνονται περισσότερο μέχρι του σημείου που πέφτουν ελεύθερα προς τα κάτω και κατακρημνίζονται ακολουθώντας μια παραβολική τροχιά (Σχήμα 3.3α). Η πτώση και το κατρακύλισμα των ράβδων ή των σφαιρών λειοτριβεί το μετάλλευμα που συνυπάρχει με αυτές μέσα στο μύλο. Οι κυριότερες δυνάμεις που ασκούνται στους κόκκους του μεταλλεύματος είναι οι δυνάμεις κρούσης, λόγω της ελεύθερης πτώσης των ράβδων και τριβής, λόγω της κύλισης των ράβδων μεταξύ τους.



Σχήμα 3.3: α) Κίνηση φορτίου εντός περιστρεφόμενου μύλου, β) Δυνάμεις που ασκούνται στα μέσα λειοτρίβησης [10]

Η ανύψωση μιας ράβδου παρασυρόμενης από την περιστροφική κίνηση του μύλου εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής. Η δύναμη που κρατάει τη σφαίρα επί του τυμπάνου είναι η φυγόκεντρος με διεύθυνση που περνάει από το κέντρο του τυμπάνου και της ράβδου και φορά προς τα έξω (Σχήμα 3.3β). Το υψηλότερο σημείο

στο οποίο μπορεί να φτάσει μία ράβδος κατά την περιστροφή του μύλου είναι η κορυφή του κελύφους, όπου η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής N_c δίνεται από τη σχέση (3.1):

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} (rpm) , \quad (3.1)$$

όπου το D σε m. Για συχνότητες μεγαλύτερες ή ίσες της N_c (γρήγορη περιστροφή) οι ράβδοι δεν πέφτουν και παραμένουν συνεχώς κολλημένοι στο κέλυφος του μύλου, οπότε δε γίνεται λειοτρίβηση μέσα στο μύλο και το κέλυφος φθείρεται. Συνήθως οι μύλοι περιστρέφονται με συχνότητα 60-80% της κρίσιμης συχνότητας N_c .

Σε μικρές συχνότητες περιστροφής δεν έχουμε ελεύθερη πτώση των ράβδων ή των σφαιρών του μύλου και απλά κυλίονται η μία πάνω στην άλλη. Η κίνηση αυτή δεν είναι αποδοτική και δημιουργεί πολλά ψιλά. Σε κανονική λειτουργία του μύλου υπάρχει πτώση των μέσων λειοτρίβησης που δημιουργεί κρούσεις και κατάτμηση του μεταλλεύματος.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο ραβδόμυλος, ως μηχανή λειοτρίβησης για την κατάτμηση του λεπτόκοκκου υλικού. Το υλικό τροφοδοσίας των ραβδόμυλων είναι συνήθως -30mm και μπορούν να δεχτούν και -50mm. Μεταξύ των ράβδων υπάρχουν κόκκοι διαφόρων μεγεθών και η θραύση γίνεται κατά προτίμηση στους μεγαλύτερους. Το αποτέλεσμα είναι να παράγουν ένα ομοιόμορφο υλικό με όσο το δυνατόν λιγότερα ψιλά και λίγα επίσης χονδρά.

3.3 Μαγνητικός διαχωρισμός

Ο μαγνητικός διαχωρισμός είναι η μέθοδος εμπλουτισμού που εκμεταλλεύεται τη διαφορά στις μαγνητικές ιδιότητες των ορυκτών. Εφαρμόζεται για την ανάκτηση χρήσιμων μαγνητικών ορυκτών από τα στείρα μη μαγνητικά. Ο μαγνητικός διαχωρισμός επιτυγχάνεται με έλξη των μαγνητικών τεμαχίων από το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη και συγχρόνως την πρακτικά ανεπηρέαστη διέλευση των μη μαγνητικών διαμέσου του πεδίου αυτού [11]. Τα υλικά διακρίνονται, ανάλογα με τη συμπεριφορά τους σε ένα μαγνητικό πεδίο, στις παρακάτω κατηγορίες:

- Σιδηρομαγνητικά: η δύναμη έλξης αυτών των υλικών από τα μαγνητικά πεδία είναι πολύ μεγάλη. Είναι πολύ επιδεκτικά στις ελκτικές δυνάμεις και πολλά από αυτά παραμένουν μαγνητισμένα, όταν απομακρύνονται από το μαγνητικό πεδίο. Εμπλουτίζονται εύκολα με μαγνητικούς διαχωριστές χαμηλής έντασης.
- Παραμαγνητικά: είναι υλικά που έλκονται από τις γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου και οδεύουν προς τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου αυξάνει.
 Μπορούν να εμπλουτιστούν με μαγνητικούς διαχωριστές υψηλής έντασης.
- Διαμαγνητικά: είναι υλικά που απωθούνται από τις γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου και οδεύουν προς τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου εξασθενεί. Οι ασκούμενες δυνάμεις είναι κατά κανόνα πολύ μικρές και πρακτικά δεν επηρεάζονται από το μαγνητικό διαχωρισμό.

Ο σίδηρος και το νικέλιο συγκαταλέγονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Μαγνητική συμπεριφορά στο μετάλλευμά μας εμφανίζουν τα ορυκτά που περιέχουν σίδηρο, όπως ο αιματίτης (Fe₂O₃), ο γκαιτίτης (FeO-OH) και ο χρωμίτης (FeCr₂O₄). Στα μη μαγνητικά συγκαταλέγονται ο σερπεντίνης (Mg₆(OH)₈Si₄O₁₀), ο χαλαζίας (SiO₂) και ο ασβεστίτης (CaCO₃).

Οι συσκευές στις οποίες πραγματοποιήθηκε ο μαγνητικός διαχωρισμός στην παρούσα εργασία είναι ο ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής (Perm-Roll) (Σχήμα 3.5) και ο ξηρός μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης (High Intensity Induced Roll Magnetic Separator MIH (13) της Carpco) (Σχήμα 3.6).

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου καθορίζει την καθαρότητα του συμπυκνώματος ή την ανάκτηση σε μέταλλο. Το ποσοστό του μαγνητικού συστατικού καθορίζει τη μαγνητική συμπεριφορά του ενδιάμεσου κλάσματος. Η κρίσιμη συχνότητα περιστροφής μαγνητικού τυμπάνου δίνεται από τον τύπο (3.2):

$$N_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad , \quad (3.2)$$

όπου N_c : κρίσιμη ταχύτητα (rpm), g: επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²), R: ακτίνα τυμπάνου (m)



Σχήμα 3.4: Ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής [11]



Σχήμα 3.5: Ταινιοφόρος μαγνητικός διαχωριστής του εργαστηρίου εμπλουτισμού μεταλλευμάτων



Σχήμα 3.6: Μαγνητικός διαχωριστής υψηλής έντασης του εργαστηρίου εμπλουτισμού μεταλλευμάτων

3.4 Ταξινόμηση μεγέθους με υδροταξινομητή

Η υδροταξινόμηση είναι μέθοδος διαχωρισμού στερεών σωματιδίων κατά μέγεθος με βάση τη διαφορά της τερματικής ταχύτητας που αποκτούν κατά την καθίζησή τους μέσα σε ένα υγρό, συνήθως νερό. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για μικρά μεγέθη κόκκων που η ταξινόμησή τους με κοσκίνιση είναι ασύμφορος. Η τερματική ταχύτητα καθίζησης ενός σωματιδίου εξαρτάται από τη διάμετρό του, αλλά και από την διαφορά πυκνότητας μεταξύ του σωματιδίου και του υγρού.

Ένας τύπος υδροταξινομητή είναι ο υδροκυκλώνας, ο οποίος αποτελείται από ένα κυλινδρικό τμήμα, στο άνω μέρος του οποίου εισάγεται εφαπτομενικά ο πολφός τροφοδοσίας. Στην άνω βάση του κυλίνδρου υπάρχει ένας σωλήνας εξόδου, ομοαξονικός προς τον κύλινδρο του κυκλώνα, που ονομάζεται οδηγός υπερχείλισης. Στο κάτω μέρος του κυλίνδρου υπάρχει ένας ανεστραμμένος κώνος με άνοιγμα στο κάτω μέρος για την απορροή του υλικού [10].

3.4.1 Σύστημα ταξινόμησης με υδροταξινομητή Warman

Το σύστημα ταξινόμησης λεπτόκοκκου υλικού με υδροταξινομητή Warman (Σχήμα 3.7) απαρτίζεται από πέντε υδροκυκλώνες τοποθετημένους σε σειρά, μία δεξαμενή νερού, αντλία, ροόμετρο, μανόμετρο, θερμόμετρο, χρονοδιακόπτη και δοχείο τροφοδοσίας.

Μέσα στον κύλινδρο τα σωματίδια κινούνται σε μία κυκλική τροχιά με γραμμική ταχύτητα V_t εφαπτομενική της τροχιάς κίνησης. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από την απόσταση r από το κέντρο του άξονα, τη ζώνη του κυκλώνα, την περιεκτικότητα του πολφού σε στερεά. Λόγω της κυκλικής κίνησης των σωματιδίων εξασκείται σε αυτά μια φυγόκεντρος δύναμη, που δίνεται από τη σχέση (3.3):

$$F_c = \frac{m \cdot V_t^2}{r} \quad (3.3)$$

Στα μεγαλύτερα σωματίδια με τη μεγαλύτερη μάζα εξασκείται μεγαλύτερη φυγόκεντρος δύναμη και έτσι οδεύουν γρηγορότερα προς την περιφέρεια. Με τη συνεχή εισροή πολφού στον κυκλώνα δημιουργείται και μια οριζόντια κίνηση του νερού από την περιφέρεια προς το κέντρο του άξονα. Η οριζόντια κίνηση παρασύρει τους μικρούς κόκκους προς το κέντρο υπερνικώντας τη φυγόκεντρο δύναμη. Αντίθετα, στους μεγάλους κόκκους υπερισχύει η φυγόκεντρος δύναμη και οδεύουν προς την περιφέρεια. Υπάρχει όμως και κάποιο μέγεθος κόκκου στο οποίο οι δύο δυνάμεις ισορροπούν.



Σχήμα 3.7: Υδροταξινομητής Warman

Εκτός από την περιφερειακή και οριζόντια κίνηση, δημιουργούνται δευτερογενείς κινήσεις του νερού. Η μία, στο άνω μέρος του κυλινδρικού τμήματος του κυκλώνα, βοηθάει την ταξινόμηση των χονδρών κόκκων προς την περιφέρεια και των ψιλών προς το κέντρο. Η άλλη δημιουργείται στο κωνικό τμήμα του κυκλώνα, όπου υπάρχει μια ροή καθοδική προς την απορροή. Όλη αυτή η ροή δεν χωράει να διαφύγει από την απορροή και έτσι αλλάζει φορά και κατευθύνεται προς τα πάνω.

Ο πολφός του προς διαχωρισμό υλικού διοχετεύεται από το δοχείο τροφοδοσίας στο ρεύμα του ρέοντος νερού και μαζί με αυτό εισέρχεται στον κυκλώνα No1. Η είσοδος γίνεται εφαπτομενικά με αποτέλεσμα τα στερεά να φυγοκεντρίζονται και να διαχωρίζονται τα χονδρά προς τα πάνω (apex chamber), ενώ τα ψιλά προς τα κάτω (vortex chamber) και να οδηγούνται στον επόμενο κυκλώνα. Η υπερχείλιση του κάθε κυκλώνα αποτελεί την τροφοδοσία του επόμενου. Τα ψιλά του τελευταίου (No5) απορρίπτονται.

Τα δείγματα τα οποία συγκεντρώνονται από τις απορροές των κυκλώνων περιέχουν κόκκους μεγέθους μεγαλύτερου αυτού στο οποίο ταξινομεί ο συγκεκριμένος κυκλώνας (πραγματικό μέγεθος διαχωρισμού) και μικρότερου αυτού που ταξινομεί ο προηγούμενος κυκλώνας.

3.5 Μορφοποίηση δοκιμίων

Η μορφοποίηση περιλαμβάνει τις ακόλουθες διεργασίες: ανάμιξη, εξώθηση, ξήρανση και έψηση [12]. Η ανάμιξη αποτελεί το πρώτο στάδιο κατά την παραγωγική διαδικασία της εξώθησης στο οποίο προστίθεται το λεπτόκοκκο λατεριτικό υλικό, που στάλθηκε από την ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ, με κατάλληλες ποσότητες συνδετικών, όπως μπεντονίτης ή τσιμέντο, ή χωρίς συνδετικό και νερό μέχρι να δημιουργηθεί πλαστική μάζα. Η ανάμιξη πραγματοποιήθηκε σε αναμικτήριο τύπου Z-BLADE (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Αναμικτήριο τύπου Z-BLADE

Έπειτα, ακολούθησε η εξώθηση των διαφόρων υλικών (λατερίτης με τσιμέντο, λατερίτης με μπεντονίτη και λατερίτης χωρίς συνδετικό). Η εξώθηση ανήκει στην κατηγορία των πλαστικών μεθόδων διαμόρφωσης σχήματος και χρησιμοποιείται για την μορφοποίηση αντικειμένων με σταθερή διατομή. Η εύπλαστη μάζα που δημιουργήθηκε κατά τη διαδικασία της ανάμιξης εισήχθη στον εξωθητή εμβόλιμης ροής (Σχήμα 3.9). Η μάζα εξωθήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια μέσω αντίστοιχης μήτρας.



Σχήμα 3.9: Εξωθητής εμβόλιμης ροής

Το στάδιο της μορφοποίησης ακολουθεί η διαδικασία της ξήρανσης. Η ξήρανση αποτελεί σημαντικό τμήμα της παραγωγικής διαδικασίας γιατί αν δεν γίνει προσεκτικά και η υγρασία απομακρυνθεί με μεγάλη ταχύτητα, η μορφοποιημένη μάζα μπορεί να αποκτήσει μικρορωγμές ή να παραμορφωθεί. Οι ατέλειες που τυχόν δημιουργούνται κατά το στάδιο αυτό, ενισχύονται στο στάδιο της έψησης που ακολουθεί και τελικά υποβαθμίζονται οι ιδιότητες του υλικού.

Οι μάζες που μορφοποιήθηκαν με τη διαδικασία της εξώθησης ξηράνθηκαν στο πυριαντήριο σε διαφορετικές θερμοκρασίες 40-110°C. Τα δοκίμια αυτά στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στον κλίβανο του εργαστηρίου Τεχνολογίας Κεραμικών & Υάλου σε διάφορες θερμοκρασίες (300 °C, 500 °C, 700 °C).

Όλα τα παραπάνω στάδια μορφοποίησης του λεπτόκοκκου λατεριτικού υλικού πραγματοποιήθηκαν έτσι ώστε να ακολουθήσει η δοκιμή της αντοχής σε κάμψη που έγινε με τη συσκευή NETZSCH Biegefestigkeitspruefer 401. Το κάθε δοκίμιο στηρίχθηκε στα άκρα της διάταξης και του ασκήθηκε φορτίο κάθετα προς τη μεγάλη διάσταση και σημειακά στο κέντρο (Σχήμα 3.10). Το φορτίο συνεχώς αυξανόταν με συγκεκριμένο ρυθμό μέχρις ότου επέλθει θραύση.



Σχήμα 3.10: Σχηματική διάταξη της δοκιμής αντοχή σε κάμψη

Οι μηχανικές αντοχές του υλικού αξιολογούνται με βάση τον έλεγχο αντοχής σε κάμψη 2-4 σημείων. Η μαθηματική σχέση (3.4) που συνδέει την τάση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και την εφαρμοζόμενη δύναμη είναι η παρακάτω:

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{\pi \cdot r^3} \quad (3.4),$$

όπου σ είναι η τάση σε Pa, F η δύναμη σε N, r η ακτίνα σε m και ως μήκος l ορίζεται η απόσταση των σημείων στήριξης.

3.6 Εκχύλιση

Οι σύγχρονες τεχνολογικές βελτιώσεις στην εκμετάλλευση, τον εμπλουτισμό και τη μεταλλουργία των διάφορων μεταλλευμάτων έχουν καταστήσει εκμεταλλεύσιμες ασήμαντες, παλαιότερα, εμφανίσεις μεταλλευμάτων και απορρίμματα μεταλλευτικών εκμεταλλεύσεων. Μια από τις σημαντικότερες καινοτομίες των τελευταίων χρόνων είναι η τεχνολογική ανάπτυξη της μεθόδου εκμετάλλευσης κοιτασμάτων με τη χρήση διαλυμάτων εκχύλισης [1].

Η μέθοδος εκμετάλλευσης κοιτασμάτων με τη χρήση διαλυμάτων είναι ένας ευρύτερος όρος που περιλαμβάνει όλες τις τεχνικές εκχύλισης με τις οποίες πραγματοποιείται απευθείας εξαγωγή του μετάλλου από ένα εξορυγμένο ή μη τμήμα του κοιτάσματος, τροφοδοτώντας ένα κατάλληλο διάλυμα διαμέσου της μάζας του μεταλλεύματος ή βιομηχανικού ορυκτού. Το διάλυμα αυτό στη συνέχεια συλλέγεται και επεξεργάζεται ώστε να ανακτηθούν τα πολύτιμα συστατικά που έχουν περιέλθει σε αυτό.

Η αρχή της μεθόδου της εκχύλισης που εφαρμόζεται σε σωρούς για την ανάκτηση μετάλλων από διάφορα πτωχά μεταλλεύματα είναι γνωστή από το 16° αιώνα. Η τεχνολογική, όμως, ανάπτυξη της μεθόδου πραγματοποιήθηκε την τελευταία δεκαπενταετία όταν άρχισε να εφαρμόζεται σε πτωχά μεταλλεύματα πολύτιμων μετάλλων στις ΗΠΑ. Σήμερα συγκαταλέγεται μεταξύ των φθηνότερων και αποδοτικότερων για την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων, ακόμη και για ιδιαίτερα πτωχά και δυσκατέργαστα μεταλλεύματα, τα οποία σε διαφορετικές συνθήκες θα ήταν αδύνατο να αξιοποιηθούν.

Με τον όρο εκχύλιση εννοείται η διαλυτοποίηση σε υδατικό διάλυμα μιας ενώσεως ή στοιχείου κάποιου μεταλλεύματος και η απόληψή του εκ του διαλύματος σε καθαρότερη και πυκνότερη μορφή. Τα στάδια της εκχύλισης είναι τα εξής:

- εκχύλιση (διαλυτοποίηση) της στερεάς ένωσης στο υδατικό διάλυμα με τη βοήθεια ενός διαλύτη
- διαχωρισμός του διαλύματος από το αδιάλυτο υπόλειμμα
- ανάκτηση του στοιχείου ή ένωσης του από το διάλυμα
- ανακύκλωση του διαλύτη
- ενίοτε προδιεργασία για την μετατροπή αδιάλυτων ενώσεων σε διαλύτες με φρύξη

24
Στην εκχύλιση απαιτείται εκλεκτικότητα στη διάλυση, γρήγορη αντίδραση, μεγάλη συγκέντρωση στο διάλυμα και ελάχιστο κόστος. Το μέγεθος των κόκκων του δείγματος πρέπει να είναι 100-200μm.

3.7 Φασματομετρία ατομικής απορρόφησης

Η φασματομετρία ατομικής απορρόφησης συγκαταλέγεται στις οπτικές μεθόδους ανάλυσης και το μοντέλο του εργαστηρίου είναι Elmer A Analyst 100 [h]. Η αρχή της μεθόδου περιλαμβάνει την μέτρηση της απορροφημένης ακτινοβολίας από άτομα στη θεμελιώδη κατάσταση για το στοιχείο που εξετάζεται. Η διάταξη της μεθόδου περιλαμβάνει μία πηγή ακτινοβολίας, ένα κελί ατομοποίησης του δείγματος και έναν ανιχνευτή μονοχρωμάτορα (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11: Διάταξη φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης [13]

Η πηγή ακτινοβολίας αποτελείται από μία κυλινδρική λυχνία. Το εσωτερικό του κυλίνδρου αποτελείται από το στοιχείο προς ανίχνευση. Εφαρμόζοντας τάση στη λυχνία ιονίζεται το αέριο που υπάρχει στο εσωτερικό της. Τα κατιόντα του αερίου κατευθύνονται προς την κάθοδο της λυχνίας όπου συγκρούονται με τα άτομα του προς ανίχνευση στοιχείου. Τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα τα άτομα από την κάθοδο να απομακρύνονται ιονισμένα και τελικά να εκπέμπουν ακτινοβολία η οποία είναι χαρακτηριστική για το στοιχείο που ανιχνεύουμε (Σχήμα 3.12). Για κάθε στοιχείο που ανιχνεύεται συνήθως απαιτείται διαφορετική λυχνία.



Σχήμα 3.12: Διάταξη κυλινδρικής λυχνίας [13]

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την λυχνία είναι η ακτινοβολία που απαιτείται για να ιονίσει τα άτομα που παράγονται στο καυστήρα (ατομοποίηση). Τα άτομα απορροφούν την ακτινοβολία που απαιτείται για την μετάπτωση από μία θεμελιώδη κατάσταση σε μία διεγερμένη. Η απορρόφηση είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των ατόμων του προς ανίχνευση στοιχείου και ακολουθεί το νόμο του Lambert-Beer.

$$A = \log \frac{P_o}{P} = -\log T = \varepsilon \cdot b \cdot c \quad (3.5)$$

Όπου,

Α: απορρόφηση της ακτινοβολίας από το δείγμα

Ρ: ισχύς της εξερχόμενης ακτινοβολίας

Τ: διαπερατότητα

b: απόσταση που διανύει η δέσμη της ακτινοβολίας

ε: μοριακή απορροφητικότητα

c: συγκέντρωση

Το ορατό φάσμα του περιβάλλοντος απομονώνεται ηλεκτρονικά. Η λυχνία εκπέμπει ακτινοβολία με ορισμένη συχνότητα (50-60 Hz) με την οποία είναι συγχρονισμένος ο ανιχνευτής ώστε να απορρίπτει τις ακτινοβολίες που δεν είναι στην ίδια συχνότητα και προέρχονται από το περιβάλλον. Το δείγμα περνάει μέσω του εκνεφωτή στο θάλαμο καύσης μαζί με το καύσιμο (ακετυλένιο) και το οξειδωτικό μέσο (αέρας ή N_2O). Οι μεγαλύτερες σταγόνες δείγματος (πάνω από 5μm) πέφτουν στην απορροή, ενώ για την καλύτερη μέτρηση χρειάζονται το δυνατόν λεπτότερες σταγόνες.

Τη ροή του καυσίμου και του οξειδωτικού τη ρυθμίζουμε ανάλογα το στοιχείο που ανιχνεύουμε. Μερικά στοιχεία παρουσιάζουν καλύτερη ευαισθησία στην ανίχνευση όταν η φλόγα είναι οξειδωτική και εμφανίζεται με μπλε πυρήνα, ενώ άλλα στοιχεία απαιτούν αναγωγικές συνθήκες με τη φλόγα να παρουσιάζει λευκό φωτεινό πυρήνα. Το ύψος του καυστήρα είναι κρίσιμο και ρυθμίζεται ανιχνεύοντας ταυτόχρονα την απορρόφηση.

Για τα στοιχεία που χρειάζεται μεγαλύτερη θερμοκρασία φλόγας (Si, Al, Sr, κ.α.) χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό μέσο το πρωτοξείδιο του αζώτου (N₂O). Με τη χρήση μίγματος ακετυλενίου-N₂O χρησιμοποιείται καυστήρας με μικρότερο άνοιγμα (50mm) σε σύγκριση με αυτόν που χρησιμοποιείται στο μίγμα του ακετυλενίου-αέρα (100mm). Τα παραπάνω συμβαίνουν διότι το μίγμα ακετυλενίου-N₂O παρουσιάζει μεγάλη ταχύτητα ανάφλεξης και ο μικρότερος καυστήρας εμποδίζει περιπτώσεις ανάφλεξης προς το εσωτερικό του θαλάμου καύσης (flashback).

Η υψηλή θερμοκρασία της φλόγας ιδιαίτερα όταν γίνεται χρήση του πρωτοξειδίου του αζώτου μπορεί να προκαλεί ιονισμό των ατόμων και τελικά μας οδηγεί σε υποεκτίμηση της ποσότητας του στοιχείου που μετράται. Για τον έλεγχο του ιονισμού προσθέτουμε τον κατάλληλο ιονιστή (K⁺, Na⁺, Cs⁺ κ.α.). Ο ιονιστής πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να έχει μικρότερο δυναμικό ιονισμού από το στοιχείο προς ανάλυση. Επιπλέον τα διαλύματα τα οποία εξετάζονται πρέπει να έχουν τα ίδια φυσικά χαρακτηριστικά με τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή της καμπύλης αναφοράς.

Τα παραπάνω είναι απαραίτητα ώστε οι αλληλοεπιδράσεις άλλων ιόντων να είναι ίδιες και στα προς εξέταση διαλύματα αλλά και στα πρότυπα διαλύματα. Ο έλεγχος των αλληλοεπιδράσεων μπορεί να γίνει είτε διαλέγοντας πρότυπα που ομοιάζουν στις φυσικές ιδιότητες με το προς εξέταση δείγμα, ή αραιώνοντας τα δείγματά μας ή προσθέτοντας άλλα πρότυπα ώστε να πλησιάσουμε στις φυσικές ιδιότητες του δείγματος που εξετάζουμε [13].

3.7.1 Χημική ανάλυση δείγματος

Η χημική ανάλυση του δείγματος παρέχει τη δυνατότητα της αναγνώρισης των οξειδίων που παρέχονται μέσα σε αυτό. Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη μέθοδο ατομικής απορρόφησης. Η φασματομετρία ατομικής απορρόφησης συγκαταλέγεται στις οπτικές μεθόδους ανάλυσης και το μοντέλο του εργαστηρίου είναι Elmer A Analyst 100.

Ο τρόπος διεξαγωγής των αναλύσεων έγινε σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

- Λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος από το υλικό προς ανάλυση
- Λειοτρίβηση δείγματος σε μέγεθος -0.075mm στη συσκευή του πλανητικού μύλου
- Λήψη 0.1g δείγματος, τοποθέτησή του σε κωνική φιάλη 250ml ευρύλαιμη και διαβροχή αυτού με 2-4ml απιονισμένου νερού
- Διαλυτοποίηση δείγματος με προσθήκη στη φιάλη 5ml πυκνού HNO₃, 8ml πυκνού H₂SO₄ και 10ml πυκνού HCl και θέρμανσή του σε θερμαντική πλάκα μέχρι να εκλυθούν λευκοί ατμοί
- Διήθηση σε ογκομετρική φιάλη των 250ml
- Κατάλληλη αραίωση και μέτρηση στην ατομική απορρόφηση των στοιχείων Ni, Fe, Al, Ca συγκρίνοντας τα με πρότυπα 1-6ppm Ni
- Καύση των αδιάλυτων του ηθμού στους 950°C για 2 ώρες και λήψη του βάρους τους. Με συντελεστή περίπου 0.85 βρίσκεται αρκετά καλά το περιεχόμενο σε πυρίτιο (SiO₂).

3.8 Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ

Με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων X είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση των γωνιών και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων X που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής σκόνης.

Το δείγμα βρίσκεται σε ένα μεταλλικό ή πλαστικό πλακίδιο με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζει επίπεδη επιφάνεια. Το πλακίδιο αυτό τοποθετείται στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου του περιθλασιμέτρου ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων Χ.

Ταυτόχρονα περιστρέφεται ο απαριθμητής με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και το επίπεδο του δείγματος με τη μισή τιμή της γωνιακής ταχύτητας του απαριθμητή. Η ταυτόχρονη μετατόπιση του απαριθμητή και η περιστροφή του δείγματος έχει σαν αποτέλεσμα ο πρώτος να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος με το σημείο εξόδου των ακτίνων Χ της λυχνίας.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η καταγραφή της ακτινοβολίας που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος που βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων Χ, που προέρχονται από τη λυχνία [5].

Το φαινόμενο της περίθλασης ακτίνων Χ διέπεται από το νόμο του Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \qquad (3.6)$$

όπου, η: τάξη ανάκλασης

λ: μήκος κύματος

θ: γωνία πρόσπτωσης

d: πλεγματική απόσταση των επιπέδων ανάκλασης του κρυστάλλου.

Στην περιθλασιμετρία ακτίνων Χ, το ζητούμενο μέγεθος είναι το d, γνωστό μέγεθος το λ και μετρούμενο μέγεθος το 2θ.

3.8.1 Ορυκτολογική ανάλυση δείγματος

Η ορυκτολογική εξέταση του δείγματος λατερίτη έγινε στο Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη χρήση περιθλασίμετρου ακτίνων X (XRD: X-Ray-Difraction Analysis) και του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου σε στιλπνές τομές.

Οι αναλύσεις των δειγμάτων έγιναν σε αυτοματοποιημένο σύστημα XRD τύπου D-500 Siemens. Το περιθλασίμετρο συνδέεται με μονάδα ηλεκτρικού υπολογιστή τύπου IBM με τη βοήθεια του οποίου γίνεται όλη η διαδικασία μέτρησης των δειγμάτων. Οι συνθήκες μέτρησης ήταν, ακτινοβολία Co, λ=1.7889 A°, φίλτρο Ni, τάση 35 kV, ένταση 35 mA και βήμα ακτινοσκόπησης 1°/min. Η αξιολόγηση γίνεται με τα υπάρχοντα διεθνή πρότυπα της ICPDS.

Το μετάλλευμα είναι κυρίως πισσολιθικού τύπου και περιέχει διαστρώσεις με λατύπες πυριτιόλιθων. Οι πισσόλιθοι είναι αιματιτικοί και παρουσιάζουν ποικίλο μέγεθος, με επικρατέστερο το 0.2 -0.8mm. Περιέχουν πολλά εγκλείσματα από μαγνησιοπυριτικά ορυκτά, χαλαζία και σπινελίους. Οι πισσόλιθοι αυτοί περιβάλλονται από πηλιτόμορφη συνδετική μάζα, η οποία αποτελείται από συμφύσεις μικροκρυσταλλικού αιματίτη, χλωρίτη και ιλλίτη, δηλαδή από τα ίδια σχεδόν ορυκτά σε πολύ μικρότερα μεγέθη.

Η κυρίως συνδετική ύλη είναι αιματιτική και έχει αντικαταστήσει την προϋπάρχουσα καολινιτική φάση [2]. Η συνδετική ύλη εγκλείει τους κόκκους των άλλων μακροσκοπικών ορυκτών (πισσόλιθοι, χαλαζίας) και των μικροσκοπικών κρυστάλλων χαλαζία και μαγνησιοπυριτικών, τα οποία είναι αφθονότερα στη συνδετική ύλη απ' ό,τι στους πισσόλιθους [8]. Στο μετάλλευμα συνυπάρχει και μία μικρή ποσότητα ασβεστίτη, ο οποίος προέρχεται, όπως προαναφέρθηκε, από τύπους ασβεστόλιθων που αποτελούν το περιβάλλον πέτρωμα του κοιτάσματος.

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

4.1 Προέλευση

Το δείγμα στο οποίο αναφέρεται η παρούσα εργασία, όσον αφορά τον μαγνητικό διαχωρισμό, προέρχεται από τα κοιτάσματα μεταλλεύματος λατερίτη του νομού Ευβοίας και συγκεκριμένα από το εργοτάξιο της Τριάδας. Στάλθηκε από την εταιρία Γ.Μ.Μ.Α.Ε ΛΑΡΚΟ με σκοπό την περάτωση αυτής της εργασίας. Το δείγμα αυτό είναι μέρος από το υλικό τροφοδοσίας του εργοστασίου εμπλουτισμού της συγκεκριμένης εταιρίας. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στους υδροκυκλώνες αποτελεί το απόρριμμα του εργοστασίου.

4.2 Κοκκομετρία

Το βάρος του αρχικού μου δείγματος, που κοσκινίστηκε και διαχωρίστηκε με τους μαγνήτες, ήταν 13kg. Από την κοσκίνηση του προέκυψε ότι το κλάσμα +6mm ήταν 4.9kg (38%) και το -6mm 8.1kg (62%). Έπειτα ακολούθησε θραύση του +6mm και αφού ενώθηκε με το -6mm πήρα την ακόλουθη κοκκομετρική κατανομή με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις τους όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (4.1) :

Μέγεθος	Βάρος	Βάρος					
(mm)	(kg)	(%)	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
+2.8 - 5,6	4,10	31,58	1,12	54,54	19,93	4,76	0,11
+1,4 - 2,8	4,23	32,51	1,07	58,41	17,50	4,98	0,05
+0,3 - 1,4	2,94	22,61	1,11	57,89	18,55	5,39	0,06
+0.106-0.3	1,04	8,03	1,17	47,56	23,92	6,29	0,06
-0,106	0,68	5,26	1,32	42,66	24,65	6,28	0,05
	13,00	100,00	1,20	55,37	19,39	5,18	0,07

Πίνακας 4.1: Κοκκομετρική κατανομή με αντίστοιχες χημικές αναλύσεις

Το βάρος του αρχικού μου δείγματος, που ταξινομήθηκε κατά μέγεθος στο σύστημα υδροκυκλώνων, ήταν 170g. Η κοκκομετρία του έπειτα από την υδροταξινόμησή του φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα. Επίσης, το συγκεκριμένο δείγμα μορφοποιήθηκε με σκοπό τη μέτρηση της αντοχής του υλικού αυτού.

Veral Gerra	Οριακές τιμές	Πραγματικές τιμές		
Κυκλωνας	διαμέτρων (μm)	διαμέτρων (μm)	Βάρος (g)	Βάρος(%)
1	40,5	30,8	8,4	4,94
2	30,2	23,0	16,6	9,76
3	21,9	16,7	27,4	16,12
4	15,7	12,0	25,1	14,76
5	13,2	10,1	14,6	8,59
6		-10,1	77,9	45,82
ΣΥΝΟΛΟ			170,0	100,00

Πίνακας 4.2: Οριακές και πραγματικές τιμές διαμέτρων των κλασμάτων με τα αντίστοιχα βάρη τους.

4.3 Ορυκτολογική ανάλυση

Από το ακτινοδιαγράμμα που ελήφθη με το περιθλασίμετρο και αντιστοιχεί στην εξέταση του λεπτόκοκκου λατεριτικού δείγματος -0.106mm προκύπτει ότι περιέχονται εξής ορυκτά: αιματίτης $(Fe_2O_3),$ χαλαζίας $(SiO_2),$ κλινόχλωρο τα $[(Mg_5Al)(Si_1Al)_4O_{10}(OH)_8]$ και χρωμίτης $[Fe(Al,Cr)_2O_4]$. Από τα ακτινοδιαγράμματα που αντιστοιχούν στο κλάσμα +0.3 -1mm παρατηρούμε ότι περιέχονται: στο πολύ μαγνητικό του, αιματίτης, χαλαζίας, κλινόχλωρο, χρωμίτης και μοσχοβίτης, στο ενδιάμεσα μαγνητικό του, χαλαζίας, αιματίτης, ασβεστίτης και κλινόχλωρο και στο μη μαγνητικό του, χαλαζίας, ασβεστίτης και αιματίτης. Τέλος, από τα ακτινοδιαγράμματα που αντιστοιχούν στο κλάσμα +2.8 -6mm παρατηρούμε ότι περιέχονται: στο πολύ μαγνητικό του, αιματίτης, χαλαζίας και κλινόχλωρο, στο ενδιάμεσα μαγνητικό του, αιματίτης, χαλαζίας και κλινόχλωρο και στο μη μαγνητικό του, χαλαζίας, ασβεστίτης (CaCO₃), αιματίτης και κλινόχλωρο.

Τα ορυκτά του Ni έγιναν άμεσα αντιληπτά στα ακτινοδιαγράμματα των μαγνητικών δειγμάτων και του λεπτόκοκκου -0.106mm δείγματος. Το Ni συνήθως

εμπεριέχεται στο πλέγμα των μητρικών ορυκτών με μερική αντικατάσταση του Mg σε δευτερογενή ορυκτά π.χ. νεπουίτης, νιμίτης κ.α.

4.3.1 Παρατηρήσεις στιλπνών τομών με χρήση μεταλλογραφικού μικροσκοπίου

Η ορυκτολογική εξέταση των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού και του υδροκυκλώνα έγινε με τη βοήθεια του μικροσκοπίου ανακλώμενου φωτός μέσα από μικροσκοπική εξέταση στιλπνών τομών. Από τις στιλπνές τομές του υλικού ελήφθησαν ορισμένες μικροφωτογραφίες για το κλάσμα -0.106mm, για τα πολύ μαγνητικά, τα ενδιάμεσα μαγνητικά και τα μη μαγνητικά προϊόντα των κλασμάτων +0.3 -1mm και +2.8 -6mm. Τέλος, στο μικροσκόπιο παρατηρήθηκαν και τα κλάσματα των υδροκυκλώνων του λεπτόκοκκου υλικού που στάλθηκε από την εταιρία Γ.Μ.Μ.Α.Ε ΛΑΡΚΟ.



• Μικροσκοπική εξέταση των προϊόντων του μαγνητικού διαχωρισμού

Σχήμα 4.1: Κλάσμα -0.106mm Ανακλώμενο φως, // Nic.

Στο κλάσμα -0.106mm (Σχήμα 4.1) παρατηρούνται μεμονωμένοι κόκκοι αιματίτη (λευκοί κόκκοι) και πληθώρα κόκκων συνδετικού υλικού, οι οποίοι περιέχουν εγκλείσματα πυριτικών ορυκτών, καθώς και μεμονωμένοι κόκκοι χαλαζία.



Σχήμα 4.2: Πολύ μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm Ανακλώμενο φως, // Nic

Στο πολύ μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm (Σχήμα 4.2) παρατηρούνται αρκετοί κόκκοι αιματίτη και συνδετικής ύλης. Ο αιματίτης φαίνεται λευκός, ο χαλαζίας τεφρός και η συνδετική ύλη καστανότεφρη σε παράλληλα Nicols. Η συνδετική ύλη μπορεί να εμπεριέχει χαλαζία ή άλλα πυριτικά ορυκτά. Οι κόκκοι του αιματίτη περιέχουν εγκλείσματα πυριτικών ορυκτών ή εμπεριέχονται σε κόκκους συνδετικού υλικού. Γενικά, έχουμε μη επαρκή αποδέσμευση γιατί οι κόκκοι του αιματίτη έχουν μερικώς αποδεσμευτεί.



Σχήμα 4.3: Ενδιάμεσα μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm Ανακλώμενο φως, // Nic

Στο ενδιάμεσα μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm (Σχήμα 4.3) παρατηρούνται πάλι σύμμικτοι κόκκοι αιματίτη με εγκλείσματα χαλαζία που δεν έχουν αποδεσμευτεί καλά καθώς επίσης και κόκκοι συνδετικού υλικού.

Στο μη μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm (Σχήμα 4.4), το περισσότερο υλικό είναι στείρο. Υπάρχουν ακόμα κόκκοι που δεν έχουν αποδεσμευτεί καλά αφού συναντώνται κόκκοι αιματίτη εγκλωβισμένοι μέσα στο στείρο υλικό. Το ορυκτό που υπερτερεί είναι ο χαλαζίας, αλλά και πάλι παρατηρείται πως η αποδέσμευση δεν είναι επαρκής.



Σχήμα 4.4: Μη μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +2.8 -6mm Ανακλώμενο φως, // Nic



Σχήμα 4.5: Πολύ μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm Ανακλώμενο φως, // Nic

Στο πολύ μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm (Σχήμα 4.5) φαίνεται γενικά πως η αποδέσμευση είναι καλύτερη, αλλά όχι πλήρης. Παρατηρούνται σχεδόν αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη, με ελάχιστα εγκλείσματα καθώς επίσης και κόκκοι συνδετικής ύλης. Οι πλήρως αποδεσμευμένοι κόκκοι αιματίτη είναι ελάχιστοι σε όλη την τομή.



Σχήμα 4.6: Ενδιάμεσα μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm Ανακλώμενο φως, // Nic

Στο ενδιάμεσα μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm (Σχήμα 4.6) συναντώνται σύμμικτοι κόκκοι αιματίτη και συνδετικού υλικού. Παρατηρείται πως ο αιματίτης συμμετέχει σε μικρότερο βαθμό στους σύμμικτους κόκκους από ότι συμμετείχε στο πολύ μαγνητικό προϊόν του ίδιου κλάσματος. Ακόμα, ο αιματίτης και τα πυριτικά φαίνονται να 'υπερέχουν' από το επίπεδο (υψηλή σκληρότητα), ενώ η συνδετική ύλη είναι κάτω από το επίπεδο της τομής (χαμηλή σκληρότητα).



Σχήμα 4.7: Μη μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm Ανακλώμενο φως, // Nic

Στο μη μαγνητικό προϊόν του κλάσματος +0.3 -1mm (Σχήμα 4.7) παρατηρούνται ως επί το πλείστον ελεύθεροι κόκκοι χαλαζία και συνδετικής ύλης. Η αποδέσμευση είναι σχετικά καλή γιατί δεν συναντώνται ελεύθεροι κόκκοι αιματίτη, αν και μέσα στη συνδετική ύλη υπάρχουν εγκλείσματα αιματίτη.

Μικροσκοπική εξέταση των προϊόντων της υδροταξινόμησης

Για τα κλάσματα που προέκυψαν από την υδροταξινόμηση του λεπτόκοκκου υλικού με σύστημα κυκλώνων της warman:

Στο κλάσμα 30.8μm (Σχήμα 4.8), παρατηρούνται μεμονωμένοι κόκκοι αιματίτη και πληθώρα κόκκων συνδετικού υλικού (για αυτό είναι και πιο πλούσιο).

Στο κλάσμα 23μm (Σχήμα 4.9) συναντώνται ακόμα πιο πολλοί κόκκοι συνδετικής ύλης αλλά και μεμονωμένοι κόκκοι αιματίτη, οι οποίοι συνήθως είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς του συνδετικού υλικού.

Στο κλάσμα 16.7μm (Σχήμα 4.10) παρατηρούνται πολύ μικροί κόκκοι συνδετικού υλικού και ίχνη λεπτόκοκκου αιματίτη.

Στο κλάσμα 12μm (Σχήμα 4.11) συναντώνται ακόμα πιο μικροί κόκκοι συνδετικού υλικού και ίχνη αποδεσμευμένου λεπτόκοκκου αιματίτη.

Στο κλάσμα 10.1μm (Σχήμα 4.12) παρατηρούνται πάρα πολύ μικροί κόκκοι συνδετικής ύλης και ίχνη αποδεσμευμένου λεπτόκοκκου αιματίτη. Γενικά παρατηρείται ότι οι κόκκοι του συνδετικού υλικού είναι μεγαλύτεροι από τους κόκκους του αιματίτη.



Σχήμα 4.8: Κλάσμα 30.8μm από τον υδροταξινομητή warman Ανακλώμενο φως, // Nic



Σχήμα 4.9: Κλάσμα 23μm Ανακλώμενο φως, // Nic



Σχήμα 4.10: Κλάσμα 16.7μm Ανακλώμενο φως, // Nic



Σχήμα 4.11: Κλάσμα 12μm Ανακλώμενο φως, // Nic



Σχήμα 4.12: Κλάσμα 10.1μm Ανακλώμενο φως, // Nic

4.3.2 Συμπεράσματα και προτάσεις από τη μικροσκοπική ανάλυση

Παρατηρείται ότι ο εμπλουτισμός του κλάσματος +2.8 -6mm δεν είναι καλός γιατί το συνδετικό υλικό συναντάται και στα τρία προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού. Στόχος ήταν να πάρουμε αυτή τη συνδετική ύλη χωριστά, η οποία είναι πλούσια σε Ni, έτσι ώστε να πετύχουμε καλύτερη αποδέσμευση. Αν και η ιδέα του εμπλουτισμού του λατερίτη που πραγματοποιήθηκε σε αυτή την εργασία ήταν ότι η αποδέσμευση αυξάνεται μειώνοντας τη διάμετρο των κόκκων, δεν πέτυχε πλήρως την καλύτερη δυνατή αποδέσμευση. Το μετάλλευμα έπρεπε να είχε λειοτριβηθεί έτσι ώστε να σπάσει σε μικρότερα τεμάχια η συνδετική ύλη που είναι εύθρυπτη.

Οι κόκκοι του μεταλλεύματος αποτελούνται από πολλές φάσεις (αιματίτης, χαλαζίας που ενώνονται με συνδετική ύλη) και στόχος ήταν να σπάσει το υλικό τόσο ώστε να μείνουν ελεύθεροι οι κόκκοι του και η συνδετική ύλη να πάει στα ψιλά κλάσματα. Έτσι λόγω της παρουσίας συσσωματωμάτων από κόκκους αιματίτη που συνδέονται μεταξύ τους με τη συνδετική ύλη, ο μαγνήτης πιάνει τους κόκκους του αιματίτη και κατά συνέπεια δεν γίνεται αποδέσμευση των κόκκων του. Από τις παραπάνω μικροφωτογραφίες των τομών παρατηρείται πως η συνδετική ύλη πάει και στα μαγνητικά και στα μη μαγνητικά κλάσματα.

Μέσα στις προοπτικές του εμπλουτισμού του λατερίτη είναι να λειοτριβηθεί σε ραβδόμυλο από την αρχή αντί να θραυτεί διαδοχικά. Κατά αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί η διάσπαση της συνδετικής ύλης από τον αιματίτη και τον χαλαζία λόγω του ότι στη λειοτρίβηση σε ραβδόμυλο ασκούνται περισσότερες δυνάμεις τριβής.

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

5.1 Μαγνητικός διαχωρισμός

Οι δοκιμές μαγνητικού διαχωρισμού έγιναν στα κλάσματα +2.8 -5.6mm, +1.0 - 2.8mm, +0.3 -1.0mm και -0.3mm από μετάλλευμα του μεταλλείου Τριάδας της εταιρείας ΛΑΡΚΟ.

Τα κλάσματα +0.3 -1.0mm και -0.3mm διαχωρίστηκαν μαγνητικά στον μαγνητικό διαχωριστή υψηλής έντασης (High Intensity Induced Roll Magnetic Separator MIH 111-5 της Carpco) ρυθμίζοντας την ένταση του πεδίου στο μέγιστο (3.16amps), την δόνηση στο 40% και την κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής στα 120rpm. Η κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής υπολογίστηκε από τον τύπο (3.2) για ακτίνα τυμπάνου R=0.06m και επιτάχυνση της βαρύτητας g=9.81m/s². Ακόμα, μηδενίζοντας το μαγνητικό πεδίο, ορίστηκαν οι θέσεις των λεπίδων διαχωρισμού, έτσι ώστε όλο το υλικό να περνάει οριακά στο μη μαγνητικό. Πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικά περάσματα του υλικού σε δύο διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής: 120rpm και 100rpm. Από το πρώτο πέρασμα (120rpm) συλλέχθηκε το πολύ μαγνητικό προϊόν (μαγνητικό 1), ενώ το μη μαγνητικό αποτελούσε την τροφοδοσία δεύτερου περάσματος (100rpm). Από το δεύτερο συλλέχθηκε το ενδιάμεσο μαγνητικό (μαγνητικό 2) και το τελικό μη μαγνητικό προϊόν.

Τα κλάσματα +2.8 -6mm και +1.0 -2.8mm οδηγήθηκαν στον ταινιοφόρο μαγνητικό διαχωριστή (Perm-Roll). Σε αυτή τη συσκευή ρυθμίστηκε ο ρυθμός τροφοδοσίας του υλικού στο μαγνήτη και η θέση της λεπίδας διαχωρισμού. Η κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου ρυθμίστηκε αρχικά στα 160 rpm, με βάση τον τύπο (3.2) για R=0.035m g=9.81m/s². Ακόμα, μηδενίζοντας το μαγνητικό πεδίο, ορίστηκαν η θέση της λεπίδας διαχωρισμού, έτσι ώστε όλο το υλικό να περνάει οριακά στο μη μαγνητικό. Πραγματοποιήθηκαν δύο διαδοχικά περάσματα του υλικού σε δύο διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής: 160rpm και 120rpm. Στο πρώτο πέρασμα (160rpm) συλλέχθηκε το πολύ μαγνητικό κλάσμα (μαγνητικό 1), ενώ το μη μαγνητικό του δεύτερου περάσματος (120rpm) αποτελούσε το ενδιάμεσο μαγνητικό (μαγνητικό 2) και το μη μαγνητικό αποτελούσε το τελικό μη μαγνητικό προϊόν. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μαγνητικών διαχωρισμών καθώς και οι κατανομές αυτών για τα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα. Όλα τα μαγνητικά και τα τελικά μη μαγνητικά προϊόντα του κάθε κλάσματος ζυγίστηκαν και αναλύθηκαν. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

			-	Χημικές	; Αναλύ	σεις (%))
Μέγεθος (mm)	Βάρος (kg)	Βάρος (%)	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
2,8-5,6	4,10	31,58	1,12	54,54	19,93	4,76	0,11
1,0-2,8	4,23	32,51	1,07	58,41	17,50	4,98	0,05
0,3 – 1,0	2,94	22,61	1,11	57,89	18,55	5,39	0,06
0,1-0,3	1,04	8,03	1,17	47,56	23,92	6,29	0,06
-0,1	0,68	5,26	1,32	42,66	24,65	6,28	0,05
	13,00	100,00	1,20	55,37	19,39	5,18	0,07

Πίνακας 5.1: Κοκκομετρικά κλάσματα με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις τους

					Χημικές	Αναλύσ	εις (%)		-	Μεταλλομ	ιονάδες κλ	άσματος	5	K	ατανομή	επί κλάσ	σματος (%	(0)
ΚΛΑΣΜΑ	ПЕРІГРАФН	Β% Κλάσμα- τος	Β(%) επί του αρχικού	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
	μαγνητικό 1	33,2	10,48	1,16	58,77	17,17	4,83	0,02	0,386	19,502	5,698	1,602	0,005	34,5	35,8	28,6	33,7	5,0
2,8-6	μαγνητικό 2	56,9	17,96	1,16	56,20	18,02	4,95	0,02	0,661	31,960	10,248	2,815	0,011	59,1	58,6	51,4	59,2	9,8
perm roll	μη μαγνητικό	9,9	3,14	0,73	30,95	40,04	3,41	0,94	0,072	3,077	3,981	0,339	0,094	6,5	5,6	20,0	7,1	85,2
	ΣΥΝΟΛΟ	100	31,58	1,12	54,54	19,93	4,76	0,11	1,119	54,539	19,927	4,755	0,110	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	μαγνητικό 1	86,5	28,13	1,08	59,00	17,00	5,00	0,02	0,934	51,051	14,710	4,327	0,017	87,2	87,4	84,1	86,8	34,0
1-2,8	μαγνητικό 2	13,0	4,23	1,04	56,02	19,64	4,99	0,04	0,135	7,289	2,555	0,649	0,006	12,6	12,5	14,6	13,0	11,3
perm roll	μη μαγνητικό	0,5	0,15	0,39	15,82	50,07	1,79	6,02	0,002	0,073	0,231	0,008	0,028	0,2	0,1	1,3	0,2	54,7
	ΣΥΝΟΛΟ	100	32,51	1,07	58,41	17,50	4,98	0,05	1,071	58,413	17,495	4,984	0,051	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	μαγνητικό 1	97,7	22,10	1,12	58,38	18,19	5,43	0,03	1,090	57,033	17,772	5,301	0,025	98,3	98,5	95,8	98,4	41,0
0,3-1	μαγνητικό 2	2,0	0,45	0,90	39,29	30,18	4,11	0,30	0,018	0,782	0,600	0,082	0,006	1,6	1,4	3,2	1,5	9,5
induced roll	μη μαγνητικό	0,3	0,07	0,27	23,29	57,89	1,08	9,88	0,001	0,072	0,179	0,003	0,031	0,1	0,1	1,0	0,1	49,5
	ΣΥΝΟΛΟ	100	22,62	1,11	57,89	18,55	5,39	0,06	1,109	57,887	18,551	5,386	0,062	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	μαγνητικό 1	99,6	8,00	1,17	47,70	23,80	6,30	0,03	1,170	47,518	23,711	6,281	0,034	99,9	99,9	99,1	99,9	56,3
0,1-0,3	μαγνητικό 2	0,2	0,02	0,53	12,73	49,13	2,07	7,14	0,001	0,032	0,122	0,005	0,018	0,1	0,1	0,5	0,1	29,3
induced roll	μη μαγνητικό	0,1	0,01	0,12	5,76	70,47	0,54	7,02	0,000	0,007	0,088	0,001	0,009	0,0	0,0	0,4	0,0	14,4
	ΣΥΝΟΛΟ	100	8,03	1,17	47,56	23,92	6,29	0,06	1,172	47,557	23,921	6,286	0,061	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-0,106	ΣΥΝΟΛΟ	100	5,26	1,32	42,66	24,65	6,28	0,05	1,316	42,661	24,650	6,276	0,048	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	ΣΥΝΟΛΟ		100,00	1,12	55,37	19,39	5,18	0,07										

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις, τις μεταλλομονάδες και την κατανομή επί του κλάσματος

				Χημικέ	ς Αναλύο	σεις (%)			Μεταλλ	ομονάδες	αρχικού]	Κατανομ	ή επί αρχ	χικού (%)	
ΚΛΑΣΜΑ	ПЕРІГРАФН	Β% Κλάσμα- τος	Β(%) επί του αρχικού	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
	μαγνητικό 1	33,2	10,48	1,16	58,77	17,17	4,83	0,02	0,122	6,159	1,799	0,506	0,002	10,92	11,12	9,28	9,77	2,38
2,8-6	μαγνητικό 2	56,9	17,96	1,16	56,20	18,02	4,95	0,02	0,209	10,093	3,236	0,889	0,003	18,70	18,23	16,69	17,17	4,68
perm roll	μη μαγνητικό	9,9	3,14	0,73	30,95	40,04	3,41	0,94	0,023	0,972	1,257	0,107	0,030	2,04	1,75	6,48	2,07	40,75
	ΣΥΝΟΛΟ	100	31,58	1,12	54,54	19,93	4,76	0,11	0,353	17,223	6,293	1,502	0,035	31,67	31,11	32,45	29,02	47,80
	μαγνητικό 1	86,5	28,13	1,08	59,00	17,00	5,00	0,02	0,304	16,597	4,782	1,407	0,006	27,23	29,97	24,66	27,18	7,74
1-2,8	μαγνητικό 2	13,0	4,23	1,04	56,02	19,64	4,99	0,04	0,044	2,370	0,831	0,211	0,002	3,93	4,28	4,28	4,08	2,57
perm roll	μη μαγνητικό	0,5	0,15	0,39	15,82	50,07	1,79	6,02	0,001	0,024	0,075	0,003	0,009	0,05	0,04	0,39	0,05	12,45
	ΣΥΝΟΛΟ	100	32,51	1,07	58,41	17,50	4,98	0,05	0,348	18,990	5,688	1,620	0,017	31,21	34,30	29,33	31,31	22,76
	μαγνητικό 1	97,7	22,10	1,12	58,38	18,19	5,43	0,03	0,247	12,901	4,020	1,199	0,006	22,10	23,30	20,73	23,17	7,89
0,3-1	μαγνητικό 2	2,0	0,45	0,90	39,29	30,18	4,11	0,30	0,004	0,177	0,136	0,018	0,001	0,36	0,32	0,70	0,36	1,83
induced roll	μη μαγνητικό	0,3	0,07	0,27	23,29	57,89	1,08	9,88	0,000	0,016	0,041	0,001	0,007	0,02	0,03	0,21	0,01	9,54
	ΣΥΝΟΛΟ	100	22,62	1,11	57,89	18,55	5,39	0,06	0,251	13,094	4,196	1,218	0,014	22,48	23,65	21,64	23,54	19,26
	μαγνητικό 1	99,6	8,00	1,17	47,70	23,80	6,30	0,03	0,094	3,816	1,904	0,504	0,003	8,42	6,89	9,82	9,74	3,78
0,1-0,3	μαγνητικό 2	0,2	0,02	0,53	12,73	49,13	2,07	7,14	0,000	0,003	0,010	0,000	0,001	0,01	0,00	0,05	0,01	1,97
induced roll	μη μαγνητικό	0,1	0,01	0,12	5,76	70,47	0,54	7,02	0,000	0,001	0,007	0,000	0,001	0,00	0,00	0,04	0,00	0,97
	ΣΥΝΟΛΟ	100	8,03	1,17	47,56	23,92	6,29	0,06	0,094	3,819	1,921	0,505	0,005	8,43	6,90	9,90	9,75	6,72
-0,106	ΣΥΝΟΛΟ	100	5,26	1,32	42,66	24,65	6,28	0,05	0,069	2,244	1,297	0,330	0,003	6,21	4,05	6,69	6,38	3,45
	ΣΥΝΟΛΟ		100,00	1,12	55,37	19,39	5,18	0,07	1,116	55,370	19,394	5,175	0,073	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις, τις μεταλλομονάδες και την κατανομή επί του αρχικού δείγματος

Πίνακας 5.4: Αθροιστικά αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις, τις μεταλλομονάδες και την κατανομή επί του κλάσματος

									Α	ΑΘΡΟΙΣΤ	ΙΚΩΣ ΜΑ	CNHTI	KA					
					Χημικέ	ς Αναλύ	σεις (%)			Μεταλλομ	ιονάδες κλ	άσματος		K	ζατανομή	επί κλάμ	ιατος (%	b)
ΚΛΑΣΜΑ	ПЕРІГРАФН	Β% Κλάσμα- τος	Β(%) επί του αρχικού	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
2,8-6	αθροιστικώς μαγνητικά	90,1	28,44	1,16	57,14	17,71	4,90	0,02	1,047	51,462	15,946	4,416	0,016	93,5	94,4	80,0	92,9	14,8
perm roll	μη μαγνητικό	9,9	3,14	0,73	30,95	40,04	3,41	0,94	0,072	3,077	3,981	0,339	0,094	6,5	5,6	20,0	7,1	85,2
	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	31,58	1,12	54,54	19,93	4,76	0,11	1,119	54,539	19,927	4,755	0,110	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1-2,8	αθροιστικώς μαγνητικά	99,5	32,36	1,07	58,61	17,34	5,00	0,02	1,069	58,340	17,264	4,976	0,023	99,8	99,9	98,7	99,8	45,3
perm roll	μη μαγνητικό	0,5	0,15	0,39	15,82	50,07	1,79	6,02	0,002	0,073	0,231	0,008	0,028	0,2	0,1	1,3	0,2	54,7
	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	32,51	1,07	58,41	17,50	4,98	0,05	1,071	58,413	17,495	4,984	0,051	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,3-1	αθροιστικώς μαγνητικά	99,7	22,55	1,11	57,99	18,43	5,40	0,03	1,108	57,815	18,372	5,383	0,031	99,9	99,9	99,0	99,9	50,5
induced roll	μη μαγνητικό	0,3	0,07	0,27	23,29	57,89	1,08	9,88	0,001	0,072	0,179	0,003	0,031	0,1	0,1	1,0	0,1	49,5
	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	22,62	1,11	57,89	18,55	5,39	0,06	1,109	57,887	18,551	5,386	0,062	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,1-0,3	αθροιστικώς μαγνητικά	99,9	8,02	1,17	47,61	23,86	6,29	0,05	1,172	47,550	23,833	6,286	0,052	100,0	100,0	99,6	100,0	85,6
induced roll	μη μαγνητικό	0,1	0,01	0,12	5,76	70,47	0,54	7,02	0,000	0,007	0,088	0,001	0,009	0,0	0,0	0,4	0,0	14,4
	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	8,03	1,17	47,56	23,92	6,29	0,06	1,172	47,557	23,921	6,286	0,061	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-0,106	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	5,26	1,32	42,66	24,65	6,28	0,05	1,316	42,661	24,650	6,276	0,048	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	ΣΥΝΟΛΟ		100,00															

Πίνακας 5.5: Αθροιστικά αποτελέσματα μαγνητικού διαχωρισμού με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις, τις μεταλλομονάδες και την κατανομή επί του αρχικού δείγματος

									Α	ΘΡΟΙΣΤΙ	κΩΣ ΜΑΓ	NHTIK.	4					
					Χημικέ	ς Αναλύο	σεις (%)			Μεταλλο	μονάδες α	ρχικού		I	Κατανομ	ή επί αργ	ικού (%)
ΚΛΑΣΜΑ	ПЕРІГРАФН	Β% Κλάσμα- τος	Β(%) επί του αρχικού	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
2,8-6	αθροιστικώς μαγνητικά	90,1	28,44	1,16	57,14	17,71	4,90	0,02	0,331	16,252	5,036	1,395	0,005	29,63	29,35	25,97	26,95	7,06
perm roll	μη μαγνητικό	9,9	3,14	0,73	30,95	40,04	3,41	0,94	0,023	0,972	1,257	0,107	0,030	2,04	1,75	6,48	2,07	40,75
	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	31,58	1,12	54,54	19,93	4,76	0,11	0,353	17,223	6,293	1,502	0,035	31,67	31,11	32,45	29,02	47,80
1-2,8	αθροιστικώς μαγνητικά	99,5	32,36	1,07	58,61	17,34	5,00	0,02	0,348	18,966	5,613	1,618	0,007	31,16	34,25	28,94	31,26	10,31
perm roll	μη μαγνητικό	0,5	0,15	0,39	15,82	50,07	1,79	6,02	0,001	0,024	0,075	0,003	0,009	0,05	0,04	0,39	0,05	12,45
	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	32,51	1,07	58,41	17,50	4,98	0,05	0,348	18,990	5,688	1,620	0,017	31,21	34,30	29,33	31,31	22,76
0,3-1	αθροιστικώς μαγνητικά	99,7	22,55	1,11	57,99	18,43	5,40	0,03	0,251	13,078	4,156	1,218	0,007	22,46	23,62	21,43	23,53	9,72
induced roll	μη μαγνητικό	0,2	0,07	0,27	23,29	57,89	1,08	9,88	0,000	0,016	0,041	0,001	0,007	0,02	0,03	0,21	0,01	9,54
	ΣΥΝΟΛΟ	99,9	22,62	1,11	57,89	18,55	5,39	0,06	0,251	13,094	4,196	1,218	0,014	22,48	23,65	21,64	23,54	19,26
0,1-0,3	αθροιστικώς μαγνητικά	99,9	8,02	1,17	47,61	23,86	6,29	0,05	0,094	3,818	1,914	0,505	0,004	8,43	6,90	9,87	9,75	5,75
induced roll	μη μαγνητικό	0,1	0,01	0,12	5,76	70,47	0,54	7,02	0,000	0,001	0,007	0,000	0,001	0,00	0,00	0,04	0,00	0,97
	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	8,03	1,17	47,56	23,92	6,29	0,06	0,094	3,819	1,921	0,505	0,005	8,43	6,90	9,90	9,75	6,72
-0,106	ΣΥΝΟΛΟ	100,0	5,26	1,32	42,66	24,65	6,28	0,05	0,069	2,244	1,297	0,330	0,003	6,21	4,05	6,69	6,38	3,45
	ΣΥΝΟΛΟ		100,00	1,12	55,37	19,39	5,18	0,07	1,116	55,370	19,394	5,175	0,073	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0



Σχήμα 5.1: Ποσοστό Νί συναρτήσει της κοκκομετρίας των κλασμάτων

5.1.1 Συμπεράσματα μαγνητικού διαχωρισμού

Από τα αποτελέσματα του μαγνητικού διαχωρισμού παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα σε Ni στα μη μαγνητικά μειώνεται με τη μείωση της κοκκομετρίας στα κλάσματα. Ακόμα, η περιεκτικότητα του Ni μειώνεται καθώς λαμβάνονται τα λιγότερο μαγνητικά προϊόντα και παίρνει ακόμα μικρότερες τιμές στα τελικά μη μαγνητικά προϊόντα.

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα, καλύτερα αποτελέσματα διαχωρισμού παρουσιάζονται στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα γιατί σε αυτά η αποδέσμευση των κόκκων είναι καλύτερη. Επίσης, από τον πίνακα 5.1 παρατηρούμε ότι το λεπτόκοκκο κλάσμα (-0.106mm) είναι πολύ πλούσιο σε Νi. Τέλος, το σύνολο του απορρίμματος είναι πολύ μικρό και δε συμφέρει να υπάρχει μονάδα μαγνητικού διαχωρισμού για να απορρίπτει τόσο μικρή ποσότητα υλικού.

5.2 Ταξινόμηση λεπτόκοκκου υλικού με υδροταξινομητή Warman

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε 200g υλικού με 15.4% υγρασία από μετάλλευμα λατερίτη το οποίο έστειλε η εταιρεία ΓΜΜΑΕ ΛΑΡΚΟ στο εργαστήριο Εμπλουτισμού μεταλλευμάτων. Δηλαδή, 170g ξηρού λεπτόκοκκου λατεριτικού υλικού μέσης πυκνότητας 3.5g/cm³ ταξινομήθηκαν με το σύστημα κυκλώνων, cyclosizer της Warman. Αυτή η ποσότητα υλικού αραιώθηκε σε ποτήρι ζέσεως των 200ml και έπειτα αυτός ο πολφός αποχύθηκε στο δοχείο τροφοδοσίας του υδροταξινομητή. Στη συνέχεια, η δεξαμενή που βρίσκεται στο κάτω μέρος του μηχανήματος γέμισε με νερό και με κλειστή τη βαλβίδα ροής ή ελέγχου, όπως επίσης και τις βαλβίδας απορροής των πέντε κυκλώνων, ενεργοποιήθηκε η αντλία. Έπειτα, ανοίχθηκε η βαλβίδα ροής ή ελέγχου, ώστε να διαφύγει ο αέρας, ρυθμίστηκε το χρονόμετρο στα 5 min και ανοίχθηκε η βαλβίδα του δοχείου τροφοδοσίας τόσο, ώστε μόλις διέλθει ο χρόνος αυτός, όλο το δείγμα να έχει παρασυρθεί από το ρεύμα του νερού.

Με το πέρας του χρόνου των 5 min κλείστηκε η βαλβίδα ροής ή ελέγχου μέχρι το ροόμετρο να δείξει την επιθυμητή παροχή 11.6 l/min (που αντιστοιχεί σε ύψος στήλης του ροομέτρου 184mm). Ακολούθησε διάστημα χρόνου 15 min όπου έγινε ο διαχωρισμός του δείγματος σε κλάσματα διαφόρων μεγεθών με σταθερή παροχή και σημειώθηκε η θερμοκρασία του νερού 20°C. Τότε ανοίγοντας τη βαλβίδα ροής ή ελέγχου και αρχίζοντας από τον τελευταίο κυκλώνα (No5), αποχύθηκε το περιεχόμενό του σε ποτήρι των 1000ml. Το ίδιο πραγματοποιήθηκε και στους υπόλοιπους κυκλώνες κατά σειρά.

Τα πέντε δείγματα που προέκυψαν πέρασαν από φίλτρο και ξηράθηκαν προς ζύγιση. Ένα μέρος από τα ψιλά του τελευταίου κυκλώνα μαζεύτηκε σε λεκάνη ενώ το υπόλοιπο διέφυγε στην αποχέτευση. Το βάρος των ψιλών υπολογίστηκε από τη διαφορά.

Ва́беі тων δεδομένων και συνθηκών του πειράματος που καταγράφηκαν και των διαγραμμάτων (Παράρτημα 3) βρέθηκαν οι συντελεστές διόρθωσης f₁, f₂, f₃ και f₄. Έτσι, προέκυψε ότι f₁=1.00, f₂=0.81, f₃=1.00 και f₄=0.94 και υπολογίστηκε ο συνολικός συντελεστής f =f₁*f₂*f₃*f₄ =1.00*0.81*1.00*0.94 =0.7614. Με βάση αυτό το συντελεστή και με δεδομένες τις οριακές τιμές των διαμέτρων διαχωρισμού των κυκλώνων (di), βρέθηκαν οι πραγματικές διάμετροι (de). Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος, καθώς επίσης τα βάρη των κλασμάτων αυτών.

Veraldere	Οριακές τιμές	Πραγματικές τιμές		
Κυκλωνας	διαμέτρων (μm)	διαμέτρων (μm)	Βάρος (g)	Βάρος(%)
1	40,5	30,8	8,4	4,94
2	30,2	23,0	16,6	9,76
3	21,9	16,7	27,4	16,12
4	15,7	12,0	25,1	14,76
5	13,2	10,1	14,6	8,59
6		-10,1	77,9	45,82
ΣΥΝΟΛΟ			170,0	100,00

Πίνακας 5.6: Οριακές και πραγματικές τιμές διαμέτρων των κλασμάτων με τα αντίστοιχα βάρη τους.

5.2.1 Συμπεράσματα υδροταξινόνησης με σύστημα κυκλώνων

Η δοκιμή αυτή έγινε για να βρεθεί η κοκκομετρική κατανομή του λεπτόκοκκου υλικού και η περιεκτικότητα του Ni στο κάθε κλάσμα. Από τους πίνακες (5.6) και (5.7) παρατηρείται ότι περίπου το 50% της τροφοδοσίας των υδροκυκλώνων είναι μικρότερο των 10μm και αποτελεί το πιο πλούσιο κοκκομετρικό κλάσμα, με περιεκτικότητα σε νικέλιο (Ni) ίση με 1.33%. Με αποτέλεσμα, η κατανομή του νικελίου στο συγκεκριμένο κοκκομετρικό κλάσμα να είναι περίπου 54% (Πίνακας 5.7). Τα κλάσματα κοκκομετρίας μεγαλύτερης από 10μm έχουν περιεκτικότητα σε Ni μικρότερη του 1%. Αυτό συμβαίνει γιατί το νικέλιο αποδεσμεύεται καλύτερα όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το κλάσμα.

		XHN	ΛΙΚΕΣ Α	ΝΑΛΥΣ	ΣΕΙΣ	XHM	ΙΚΕΣ ΑΝ	ΑΛΥΣΕ	ΙΣ ΟΞΕΙ	ΔΙΩΝ										
		2	ΣΤΟΙΧΕΙ	IΩN (%)			(%)				META.	ΛΛΟΜΟ	ΟΝΑΔΕΣ	2		КАТ	ANOMH	[(%)	
ΚΛΑΣΜΑ																				
(µm)	B(%)	Ni	Fe	Al	Ca	Ni SiO ₂ Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ CaO N 0.076 20.015 22.071 4.500 0.666 0.0					Ni	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Ni	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO
30,8	4,94	0,976	22,450	2,435	0,476	0,976	39,015	32,071	4,599	0,666	0,05	1,93	1,58	0,23	0,03	4,24	5,63	5,31	3,77	3,72
23,0	9,76	0,943	22,325	2,525	0,613	0,976 39,015 32,071 4,599 0,60 0,943 39,270 31,893 4,769 0,85				0,859	0,09	3,83	3,11	0,47	0,08	8,09	11,21	10,44	7,73	9,47
16,7	16,12	0,968	20,700	2,673	0,617	0,968	37,995	29,571	5,048	0,864	0,16	6,12	4,77	0,81	0,14	13,71	17,90	15,98	13,50	15,74
12,0	14,76	0,992	20,175	2,685	0,697	0,992	36,295	28,821	5,072	0,976	0,15	5,36	4,26	0,75	0,14	12,86	15,66	14,27	12,42	16,29
10,1	8,59	0,981	19,350	2,703	0,698	0,981	33,830	27,643	5,105	0,977	0,08	2,91	2,37	0,44	0,08	7,41	8,49	7,96	7,27	9,48
-10,1	45,82	1,334	20,975	3,853	0,625	1,334	30,685	29,964	7,277	0,875	0,61	14,06	13,73	3,33	0,40	53,69	41,10	46,04	55,31	45,31
ΣΥΝΟΛΟ	100,00					1,138	34,212	29,825	6,028	0,885	1,14	34,21	29,83	6,03	0,88	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Πίνακας 5.7: Κοκκομετρική κατανομή κλασμάτων με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις (δείγμα ΛΑΡΚΟ)

5.3 Διαδοχική θραύση

Η αρχική τροφοδοσία ήταν περίπου 10kg, πέρασε από μια σειρά κοσκίνων +5.6mm, +2.8mm, +1.4mm, +0.710mm, +0.106mm (πρώτη κοσκίνιση) και συλλέχθηκε το κάθε κλάσμα προς ζύγιση. Το +5.6mm οδηγήθηκε στο σιαγονωτό σπαστήρα και το προϊόν του πέρασε από σειρά κοσκίνων +2.8mm, +1.4mm, +0.710mm, +0.106mm (δεύτερη κοσκίνιση). Το +2.8mm της δεύτερης κοσκίνισης ενώθηκε με το +2.8mm της πρώτης κοσκίνισης, οδηγήθηκαν στο κωνικό σπαστήρα και το προϊόν που προέκυψε κοσκινήστηκε στα +1.4mm, +0.710mm, +0.106mm (τρίτη κοσκίνιση).

Στη συνέχεια, το +1.4mm της πρώτης κοσκίνισης ενώθηκε με το +1.4mm της δεύτερης και της τρίτης κοσκίνισης, οδηγήθηκαν στο κωνικό σπαστήρα και το προϊόν του πέρασε από τα κόσκινα +0.710mm, +0.106mm (τέταρτη κοσκίνιση). Το +0.710mm της πρώτης, της δεύτερης, της τρίτης και της τέταρτης σειράς κοσκίνισης ενώθηκαν, οδηγήθηκαν στο κωνικό σπαστήρα και το προϊόν του πέρασε από το κόσκινο +0.106mm. Από αυτή την κοσκίνιση προέκυψαν δύο κλάσματα: το +0.106mm και το -0.106mm. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (5.2).



Σχήμα 5.2: Διαδοχική θραύση

		Αρχικό			+5.6			+2.8			+1.4			+0.71
KΛAΣMA (mm)	B (g)	Β% Αρχι- κού	KΛAΣMA (mm)	B (g)	Β% Αρχι- κού	KΛAΣMA (mm)	B (g)	Β% Αρχι- κού	KΛAΣMA (mm)	B (g)	Β% Αρχι- κού	KΛAΣMA (mm)	B (g)	Β% Αρχι- κού
+5.6	4657,6	45,75												
+2.8-5.6	1187,7	11,67	+2.8-5.6	2371	23,29									
+1.4-2.8	1474,7	14,49	+1.4-2.8	984,2	9,67	+1.4-2.8	1606,3	15,78						
+0,71-1,4	1319,3	12,96	+0,71-1,4	549,5	5,40	+0,71-1,4	973,5	9,56	+0,71-1,4	1579,8	15,52			
+0,106-0,71	1207,8	11,86	+0,106-0,71	550	5,40	+0,106-0,71	725,2	7,12	+0,106-0,71	1833,9	18,01	+0,106-0,71	2966	29,13
-0,106	333,6	3,28	-0,106	202,9	1,99	-0,106	253,7	2,49	-0,106	651,5	6,40	-0,106	1456,1	14,30
ΣΥΝΟΛΟ	10180,7	100	ΣΥΝΟΛΟ	4657,6	45,75	ΣΥΝΟΛΟ	3558,7	34,96	ΣΥΝΟΛΟ	4065,2	39,93	ΣΥΝΟΛΟ	4422,1	43,44
Β% Αθροιστ. +0.106-0.71		11,86			17,27			24,39			42,40			71,54
Β% Αθροιστ. -0.106		3,28			5,27			7,76			14,16			28,46
Β% Αθροιστ. -0.71		15,14			22,54			32,15			56,56			100,0

Πίνακας 5.8: Διαδοχική θραύση και ταξινόμηση μεγέθους.

Πίνακας 5.9: Χημικές αναλύσεις των ψιλών κλασμάτων από τα επιμέρους τμήματα της διαδοχικής θραύσης.

					XHMIK	ΕΣ ΑΝΑΛΥΣ	εις στο	DIXEIΩN					
	Κοσκίνιση		Αθροι	ιστικά		(%)			XHM	ΠΚΕΣ ΑΝΑ	ΛΥΣΕΙΣ Ο	ΞΕΙΔΙΩΝ	(%)
ΔΕΙΓΜΑ	ΚΛΑΣΜΑ (μm)	B(%)	Ψιλά	Χοντρα	Ni	Fe	Al	Ca	Ni	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO
Αρχικό	-106	3,28	3,28	96,72	1,259	25,975	3,29	0,375	1,259	30,09	37,107	6,214	0,525
θραύση +5.6	-106	1,99	5,27	94,73	1,232	27,450	2,48	0,464	1,232	28,05	39,214	4,679	0,650
θραύση +2.8	-106	2,49	7,76	92,24	1,196	25,825	2,31	0,909	1,196	29,75	36,893	4,364	1,272
θραύση +1.4	-106	6,40	14,16	85,84	1,138	28,375	2,55	0,386	1,138	28,475	40,536	4,817	0,540
θραύση +0.71	-106	14,30	28,46	71,54	1,135	31,050	2,51	0,365	1,135	26,18	44,357	4,732	0,511
	+106 - 710	71,54			1,092	30,300	2,32	0,314	1,092	26,605	43,286	4,380	0,440
	ΣΥΝΟΛΟ	100,00							1,112				

		Αθρο	οιστικά	Αθρο	οιστικά	Αθρ	οιστικά]	Αθρο	οιστικά	Αθρ	οιστικά	Αθρο	οιστικά		Αθρ	οιστικά	Αθρ	οιστικά	Αθρ	οιστικά
μέγεθος	μονάδες	μονά	δες Νί	κατ	ανομή	Ava Ni	λύσεις %	μονάδες	μονά	δες Fe	кат	ανομή	Αναλύο	σεις Fe%	μονάδες	μονά	άδες Al	кат	τανομή	Αναλι	ύσεις Al %
mm	Ni	Ψιλά	Χονδρα	Ψιλά	Χονδρα	Ψιλά	Χονδρα	Fe	Ψιλά	Χονδρα	Ψιλά	Χονδρα	Ψιλά	Χονδρα	Al	Ψιλά	Χονδρα	Ψιλά	Χονδρα	Ψιλά	Χονδρα
					100,0		1,11														
16	0,041	0,041	1,070	3,7	96,3	1,259	1,107	1,216	1,216	41,605	2,8	97,2	37,107	43,014	0,204	0,204	4,321	4,5	95,5	6,214	4,467
5,6	0,025	0,066	1,046	5,9	94,1	1,249	1,104	0,782	1,997	40,823	4,7	95,3	37,904	43,094	0,093	0,297	4,227	6,6	93,4	5,634	4,462
2,8	0,030	0,096	1,016	8,6	91,4	1,232	1,102	0,919	2,917	39,904	6,8	93,2	37,579	43,262	0,109	0,406	4,119	9,0	91,0	5,226	4,465
1,4	0,073	0,168	0,943	15,2	84,8	1,189	1,099	2,594	5,511	37,310	12,9	87,1	38,915	43,465	0,308	0,714	3,810	15,8	84,2	5,041	4,439
0,71	0,162	0,331	0,781	29,8	70,2	1,162	1,092	6,343	11,854	30,967	27,7	72,3	41,650	43,286	0,677	1,390	3,134	30,7	69,3	4,886	4,380
0,106	0,781		1,112	100,0	0	1,110		30,967		42,821					3,134		4,524				
	1,112							42,821							4,524						

Πίνακας 5.10. Αθοοιστικές μεταλλομον	άδες κατανομή και	νημικές αναλύσεις για τ	α ψιλά και τα γογ	δοά κάθε κλάσματος
	J/ 1 1			



Σχήμα 5.3: Δοκιμές θραύσης







Σχήμα 5.5: Αθροιστική ανάκτηση Νί% των ψιλών και των χονδρών



Σχήμα 5.6: Σχέση ανάλυσης και ανάκτησης για τα ψιλά και τα χονδρά

5.3.1 Συμπεράσματα διαδοχικής θραύσης

Από το σχήμα 5.3 παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα σε Ni του ψιλού (-106μm) μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους του μητρικού κλάσματος. Τα ψιλά της αρχικής θραύσης είχαν τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Ni. Από το σχήμα 5.4 παρατηρούμε ότι η ανάλυση των ψιλών τείνει στην ανάλυση της αρχικής τροφοδοσίας καθώς επίσης, ότι τα αθροιστικά ψιλά είναι πάντα πιο πλούσια από τα αθροιστικά χονδρά. Από το σχήμα 5.5 φαίνεται ότι η ανάκτηση του Ni στα ψιλά αυξάνεται με τη μείωση της κοκκομετρίας και ότι η ανάκτηση των ψιλών τείνει στι τα ψιλά που δημιουργούνται δεν είναι τόσο πλούσια όσο τα προηγούμενα και αυτό φαίνεται από την καμπύλη των ψιλών, που όσο αυξάνεται η ανάκτηση των ψιλών μειώνεται η περιεκτικότητα σε Ni. Γενικά, θα θέλαμε μεγάλη ανάκτηση αλλά η ανάλυση να μην πέσει κάτω από 1.15%. Αν σπάσει όλο το υλικό στο -106μm θα έχει την ανάλυση της αρχικής τροφοδοσίας.

5.4 Μορφοποίηση λεπτόκοκκου υλικού

Λατεριτικό υλικό ποσότητας 500g αναμίχθηκε με 28g μπεντονίτη και προστέθηκε 1.5% νερό. Το μίγμα αυτό εξωθήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια στον εξωθητή εμβόλιμης ροής, ξηράνθηκαν μέχρι τους 110°C στο πυριαντήριο και τέλος τοποθετήθηκαν στο κλίβανο σε θερμοκρασίες 300, 500, 700°C. Για κάθε θερμοκρασία καταγράφηκε η αντίστοιχη τιμή της εφαρμοζόμενης δύναμης ώστε να επέλθει η θραύση του κάθε δοκιμίου. Η αντοχή υπολογίστηκε σύμφωνα με τον τύπο (3.4). Η ίδια διαδικασία έγινε για λατερίτη χωρίς συνδετικό και για 500g λατερίτη, τα οποία αναμίχθηκαν με 28g τσιμέντου και 20% νερό. Έτσι, προέκυψε ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 5.11) που φαίνεται η αντοχή που έχει το υλικό κάνοντας χρήση διαφορετικού συνδετικού υλικού σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας.

УЛІКО	Θερμοκρασία (°C)	Αντοχή (MPa)
Λατερίτης	110	6,26
	300	6,39
	500	7,34
	700	10,54
	110	7,42
Λατερίτης +	300	7,42
Τσιμέντο	500	7,46
	700	7,49
Λατερίτης + Μπεντονίτης	110	12,98
	300	13,93
	500	14,45
	700	14,81

Πίνακας 5.11: Αντοχή υλικού με προσθήκη συνδετικού συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η μορφοποίηση του λεπτόκοκκου λατεριτικού υλικού έγινε λόγω του ότι είναι πολύ πλούσιο σε Νi με σκοπό τη συσσωμάτωσή του για την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Στην μεταλλουργία νικελίου κατασκευάζονται pellets για να μην παρασύρεται αυτό το λεπτόκοκκο υλικό από τον αέρα στις περιστροφικές καμίνους. Έτσι, στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν δοκίμια με τη μορφή ράβδων, αντί pellets, γιατί καθιστούν πιο εύκολη την μέτρηση της αντοχής τους. Κατά αυτό τον τρόπο είναι εύκολο να επιλεχθεί το καταλληλότερο συνδετικό υλικό που αυξάνει τις μηχανικές ιδιότητες του λεπτόκοκκου λατεριτικού υλικού.



Σχήμα 5.7: Αντοχή υλικού με διάφορα συνδετικά συναρτήσει της θερμοκρασίας

5.4.1 Συμπεράσματα μορφοποίησης

Από τα αποτελέσματα της μέτρησης της αντοχής των ράβδων που παράγονται από το λεπτόκοκκο λατεριτικό υλικό με την προσθήκη διαφόρων συνδετικών υλικών, φαίνεται ότι η αντοχή των ράβδων χωρίς την προσθήκη κάποιου συνδετικού είναι 6.26MPa στους 110°C και φτάνει τα 10.54MPa στους 700°C. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό γίνεται πιο συνεκτικό όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έψησής του. Η αντοχή του στους 110°C με την προσθήκη τσιμέντου αυξάνεται στα 7.42MPa αλλά με την προσθήκη μπεντονίτη αυξάνεται περισσότερο και φτάνει τα 12.98MPa (διπλασιάζεται). Με την αύξηση της θερμοκρασίας η αντοχή του με τσιμέντο είναι ίση με 7.49MPa, ενώ με μπεντονίτη 14.81MPa, που σημαίνει ότι με το μπεντονίτη αυξάνεται περισσότερο η αντοχή του.

Από τα παραπάνω, παρατηρείται ότι το υλικό συμπεριφέρεται καλύτερα με την προσθήκη μπεντονίτη. Ακόμα, η αντοχή του με τσιμέντο δεν αυξάνεται ιδιαίτερα με την αύξηση της θερμοκρασίας (από 7.42MPa φτάνει τα 7.49MPa) και αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα όπου η ευθεία που αντιστοιχεί στην αντοχή με προσθήκη τσιμέντου είναι σχεδόν οριζόντια. Οι άλλες καμπύλες που αντιστοιχούν στο υλικό χωρίς συνδετικό και στο υλικό με μπεντονίτη, φαίνεται ότι η θερμοκρασία επιδρά στην αντοχή του και αυτό συμβαίνει λόγω της συσσωμάτωσης που λαμβάνει χώρα σε τέτοιες μεγάλες θερμοκρασίες.
5.5 Εκχύλιση

Σε αυτό το στάδιο της εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εμπλουτισμού του μεταλλεύματος με τη μέθοδο της εκχύλισης. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε για να ανακτηθεί Ni από το χονδρύτερο υλικό +0.106 -0.710mm, το οποίο έχει μικρότερη περιεκτικότητα σε Ni σε σύγκριση με το λεπτόκοκκο -0.106mm που μορφοποιήθηκε. Κατά την εκχύλιση γίνεται η διαλυτοποίηση μιας ενώσεως ή στοιχείου κάποιου μεταλλεύματος σε υδατικό διάλυμα και η απόληψη του εκ του διαλύματος σε καθαρότερη και πυκνότερη μορφή.

Τοποθετήθηκαν 10g μεταλλεύματος λατερίτη, κοκκομετρίας +0.106 -0.710mm, σε 200ml διαλύματος H₂SO₄ (60ml H₂SO₄ σε 1lt διαλύματος). Ετοιμάστηκαν τέσσερα τέτοια δείγματα έτσι ώστε να παρατηρηθεί το ποσοστό των διαλυτοποιημένων στοιχείων σε σχέση με το χρόνο εκχύλισης και κατά συνέπεια το ποσοστό της ανάκτησης τους. Για την επίτευξη της ανάδευσης του διαλύματος τοποθετήθηκαν σε τράπεζα που ρυθμίστηκε στις 200 στροφές/min. Τα τέσσερα δείγματα διηθήθηκαν την δεύτερη, την τέταρτη, την όγδοη και την δέκατη έκτη μέρα από την έναρξη της ανάδευσής τους. Στα επιμέρους διηθήματα πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις των στοιχείων Νi, Fe και Al. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων και η ανάκτηση των στοιχείων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	XHM. στο	АНАЛУ єкх. (рр	ΣΕΙΣ m)	XHM. A	АΝΑΛΥΣ] εκχ. (ppm)	Ανάκτηση (%)			
ΔΕΙΓΜΑ	Ni	Fe	Al	Ni	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Ni	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
αρχική	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1η ημέρα	61,44	338,4	110,6	61,44	483,43	208,91	11,26	2,23	9,54
2η ημέρα	92,76	340,4	144,1	92,76	486,29	272,19	17,00	2,25	12,43
4η ημέρα	132,72	505,0	186,7	132,72	721,43	352,66	24,32	3,33	16,10
8η ημέρα	176,86	620,0	242,4	176,86	885,71	457,87	32,41	4,09	20,91
16η ημέρα	256,24	725,0	280,3	256,24	1035,71	529,46	46,95	4,79	24,17

Πίνακας 5.12: Χημικές αναλύσεις του κλάσματος +0.106-0.710mm με τις αντίστοιχες ανακτήσεις συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 5.8: Συγκέντρωση στοιχείων στο διήθημα συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 5.9: Ανάκτηση των στοιχείων συναρτήσει του χρόνου

Η μέθοδος της εκχύλισης επαναλήφθηκε για το κλάσμα +0.106mm και συγχρόνως πραγματοποιήθηκε και για το λεπτόκοκκο υλικό του μεταλλεύματος - 0.106mm, με σκοπό τη σύγκριση. Δείγματα λήφθηκαν για την πέμπτη και την δέκατη έβδομη μέρα. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων και η ανάκτηση των στοιχείων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (5.13) και στο σχήμα 4.10. Κατά την επανάληψη της εκχύλισης στο κλάσμα +0.106mm επιτεύχθηκε ανάκτηση του Ni περίπου ίση με 55%, ενώ για το -0.106mm ξεπέρασε το 60%.

Πίνακας 5.13: Χημικές αναλύσεις των κλασμάτων +0.106 -0.710mm και -0.106mm με τις αντίστοιχες ανακτήσεις τους συναρτήσει του χρόνου

		ΧΗΜ. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ			ΧΗΜ. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ στο					
		στ ο εκχ. (ppm)			εкχ. (ppm)			Ανάκτηση (%)		
ΧΡΟΝΟΣ	ΚΛΑΣΜΑ		-							
(ημέρες)	(mm)	Ni	Fe	Al	Ni	Fe ₂ O ₃	Al_2O_3	Ni	Fe_2O_3	Al_2O_3
αρχική	+0,106	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,107	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	+0,106	167,75	545,0	225,2	167,75	778,57	425,38	30,72	3,60	19,42
	-0,107	211,80	720,0	255,5	211,80	1028,57	482,61	36,45	4,94	19,75
17	+0,106	294,15	740,0	412,9	294,15	1057,14	779,92	53,87	4,88	35,61
	-0,107	360,35	945,0	477,7	360,35	1350,00	902,32	62,02	6,48	36,94

Εκχύλιση 70 60 50 Ni(+0,106) Ανάκτηση (%) Fe₂O₃ (+0,106) 40 Al₂O₃ (+0,106) Ni(-0,106) 30 Fe₂O₃ (-0,106) Al₂O₃ (-0,106) 20 10 0 0 2 4 б 8 10 12 14 16 18 Χρόνος (ημέρες)

Σχήμα 5.10: Εκχύλιση των κλασμάτων +0.106mm και -0.106mm του μεταλλεύματος

5.5.1 Συμπεράσματα εκχύλισης

Από την πρώτη σειρά πειραμάτων της εκχύλισης παρατηρούμε ότι το Ni ανακτάται συναρτήσει του χρόνου έως και 50%, ενώ η ανάκτηση του Fe φτάνει περίπου το 5% και του Al είναι ίση με 24%.. Από τον πίνακα 5.12, όπου φαίνονται τα αποτελέσματα της εκχύλισης συναρτήσει του χρόνου, παρατηρούμε ότι το Ni ανακτάται ευκολότερα από το Al και ακόμα περισσότερο από τον Fe.

Από τη δεύτερη σειρά πειραμάτων φαίνεται ότι την πέμπτη μέρα της εκχύλισης ανακτάται Ni στα κλάσματα +0.106mm και -0.106mm κατά 30.72% και 36.45% αντίστοιχα (Πίνακας 5.13). Την δέκατη έβδομη μέρα, ανακτάται Ni στα +0.106mm και -0.106mm κατά 53.87% και 62.02% αντίστοιχα. Όπως είναι φανερό, με το πέρασμα του χρόνου αυξάνεται το ποσοστό της ανάκτησης του Ni ενώ των Fe και Al μένει σε χαμηλά επίπεδα, επιτυγχάνοντας έτσι εκλεκτική διαλυτοποίηση. Η καμπύλη τείνει να οριζοντιωθεί γιατί καταναλώνεται το οξύ και τελειώνει το στοιχείο προς διαλυτοποίηση (Σχήμα 5.10).

Ακόμα, η ανάκτηση των στοιχείων Ni, Fe και Al, ιδιαίτερα του νικελίου (Ni), είναι λίγο μεγαλύτερη στο κλάσμα -0.106mm από ό,τι στο +0.106mm, πρακτικά όμως είναι συγκρίσιμα. Αυτό συμβαίνει γιατί το μέγεθος των κόκκων είναι μικρότερο και επομένως οι κόκκοι του είναι καλύτερα αποδεσμευμένοι αφού έχουν σπάσει τα πλέγματα των ορυκτών που υπάρχουν στο μετάλλευμα. Έτσι, το Ni βρίσκεται ελεύθερο και όχι 'εγκλωβισμένο' σε κάποιο πλέγμα ορυκτού, κάτι το οποίο καθιστά ευκολότερη την διαλυτοποίηση του μέσα στο διάλυμα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα εργασία ερευνά τη δυνατότητα εμπλουτισμού του λατεριτικού κοιτάσματος της περιοχής Τριάδας Ευβοίας με φυσικές και χημικές διεργασίες. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιήθηκε μαγνητικός διαχωρισμός, διαδοχική θραύση και εκχύλιση. Ακόμα, πραγματοποιήθηκε υδροταξινόμηση του λεπτόκοκκου λατεριτικού υλικού με σύστημα κυκλώνων της warman και έπειτα μορφοποίηση του, έτσι ώστε να εξεταστούν οι μηχανικές του ιδιότητες.

Σκοπός της εργασίας, σε πρώτο στάδιο, είναι η απομάκρυνση τυχόν αποδεσμευμένων κόκκων ασβεστίτη και χαλαζία ώστε να πάρουμε ένα προσυμπύκνωμα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για το στάδιο αυτό είναι ο μαγνητικός διαχωρισμός. Σε δεύτερο στάδιο, προσπαθήσαμε να πετύχουμε εκλεκτική θραύση της συνδετικής ύλης από τους ολόκληρους κόκκους που συνυπάρχουν στα συσσωματώματα των πισσολίθων. Η κατάτμηση του υλικού περιελάμβανε τη θραύση και τη λειοτρίβηση που έγιναν για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχιδίων του μεταλλεύματος σε διάφορα μεγέθη.

Τα πλούσια ψιλά (-106μm) της θραύσης συσσωματώθηκαν (μορφοποιήθηκαν) έτσι ώστε να προκύψουν μεγαλύτερου μεγέθους κόκκοι οι οποίοι θα μπορούν να τροφοδοτήσουν το υπάρχον εργοστάσιο πυρομεταλλουργίας. Η μορφοποίηση του λεπτόκοκκου υλικού περιελάμβανε τις ακόλουθες διεργασίες: ανάμιξη, εξώθηση, ξήρανση και έψηση. Η επίδραση των διαφορετικών συνδετικών στη συσσωμάτωση μελετήθηκε με τη δημιουργία ράβδων, οι οποίοι ψήθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες και μετρήθηκε η αντοχή τους. Το χονδρό κλάσμα της θραύσης (+106μm -710μm) υπέστη εκχύλιση με θειικό οξύ, έτσι ώστε να ανακτηθεί νικέλιο από το πτωχό μετάλλευμα.

Με τη διαδικασία που περιγράφηκε, το πλούσιο μέρος του υλικού θα χρησιμοποιηθεί στην πυρομεταλλουργία ενώ το πτωχό στην υδρομεταλλουργία. Η διαδικασία αυτή είναι πιο επιτυχής όσο πιο εκλεκτική είναι η αρχική θραύση. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών εμπλουτισμού, θα συμβάλλει στην επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεταξύ των μεθόδων, ώστε να επιτευχθεί η ανάκτηση ενός συμπυκνώματος με ικανοποιητική περιεκτικότητα σε νικέλιο.

6.2 Συμπεράσματα δοκιμών εμπλουτισμού

Από το σύνολο των δοκιμών εμπλουτισμού που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών του μαγνητικού διαχωρισμού παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα σε Νi μειώνεται καθώς λαμβάνονται τα λιγότερα μαγνητικά προϊόντα και παίρνει τις μικρότερες τιμές στο τελικό μη μαγνητικό προϊόν. Ο εμπλουτισμός του κλάσματος +2.8 -6mm δεν είναι καλός γιατί το συνδετικό υλικό συναντάται και στα τρία προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού. Στόχος ήταν να πάρουμε τα μη μαγνητικά (στείρα) χωριστά, έτσι ώστε να πετύχουμε καλύτερη αποδέσμευση. Καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα μικρότερα κοκκομετρικά μεγέθη και αυτό οφείλεται στο ότι έχει επιτευχθεί σε αυτά καλύτερη αποδέσμευση των υπαρχόντων ορυκτών.

Αν και η ιδέα του εμπλουτισμού του λατερίτη που πραγματοποιήθηκε σε αυτή την εργασία ήταν ότι η αποδέσμευση αυξάνεται μειώνοντας τη διάμετρο των κόκκων, δεν πέτυχε πλήρως την καλύτερη δυνατή αποδέσμευση. Το μετάλλευμα έπρεπε να είχε λειοτριβηθεί έτσι ώστε να σπάσει σε μικρότερα τεμάχια η συνδετική ύλη που είναι εύθρυπτη. Επίσης, το πολύ ψιλό κλάσμα (-0.106mm) είναι πολύ πλούσιο σε Ni. Τέλος, το σύνολο του απορρίμματος είναι πολύ μικρό και δε συμφέρει να υπάρχει μονάδα μαγνητικού διαχωρισμού για να απορρίπτει τόσο μικρή ποσότητα υλικού.

Από τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής εξέτασης διαπιστώθηκε ότι οι κόκκοι του μεταλλεύματος αποτελούνται από πολλές φάσεις (αιματίτης, χαλαζίας που ενώνονται με συνδετική ύλη) και στόχος ήταν να σπάσει το υλικό τόσο ώστε να μείνουν ελεύθεροι οι κόκκοι του και η συνδετική ύλη να πάει στα ψιλά κλάσματα. Έτσι λόγω της παρουσίας συσσωματωμάτων από κόκκους αιματίτη που συνδέονται μεταξύ τους με τη συνδετική ύλη, ο μαγνήτης πιάνει τους κόκκους του αιματίτη και κατά συνέπεια δεν γίνεται αποδέσμευση των κόκκων του. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στα προϊόντα του μαγνητικού διαχωρισμού του κλάσματος +2.8 -6mm, που από τις μικροφωτογραφίες των στιλπνών τομών παρατηρείται πως η συνδετική ύλη πάει και στα μαγνητικά και στα μη μαγνητικά κλάσματα.

Η διαδοχική θραύση έγινε για την ελάττωση του μεγέθους των τεμαχίων του μεταλλεύματος, ως κύρια μέθοδος εμπλουτισμού. Η κατάτμηση του μεταλλεύματος έγινε έτσι ώστε να επιτευχθεί η αποδέσμευση του μεταλλεύματος από τα στείρα. Από τα αποτελέσματα της μεθόδου παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα σε Ni του ψιλού (-

106μm) αυξάνεται με τη μείωση του μεγέθους του μητρικού κλάσματος. Η ανάκτηση του Νι αυξάνεται με τη μείωση της κοκκομετρίας, ενώ οι χημικές αναλύσεις έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε Νι μειώνεται όσο σπάνε τα επιμέρους κλάσματα της αρχικής τροφοδοσίας.

Το ποσοστό ανάκτησης του Ni στα ψιλά (-106μm) φθάνει μόνο μέχρι το 30% και δεν θεωρείται ικανοποιητική. Σε προηγούμενες εργασίες έχει βρεθεί ότι μπορεί να φτάσει άνω του 50% όταν η ελάττωση του μεγέθους γίνει εν υγρώ [3], [6]. Η υγρή κατάτμηση δημιουργεί πρόβλημα διαχωρισμού των ψιλών από το νερό και αφήνει μεγάλο ποσοστό υγρασίας στο τελικό προϊόν. Με την ξηρή κατάτμηση τα προβλήματα αυτά εξαφανίζονται αλλά η ανάκτηση νικελίου (Ni) δεν είναι τόσο ικανοποιητική. Φαίνεται ότι το νερό καθιστά την εύθρυπτη συνδετική ύλη ακόμα πιο ασταθή.

Από τα αποτελέσματα της μέτρησης της αντοχής των ράβδων που παράγονται από το λεπτόκοκκο λατεριτικό υλικό με την προσθήκη διαφόρων συνδετικών υλικών, φαίνεται ότι η αντοχή των ράβδων χωρίς την προσθήκη κάποιου συνδετικού είναι 6.26MPa στους 110°C και φτάνει τα 10.54MPa στους 700°C. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό γίνεται πιο συνεκτικό όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έψησής του και συμβαίνει λόγω της συσσωμάτωσης που λαμβάνει χώρα σε τέτοιες μεγάλες θερμοκρασίες. Η αντοχή του στους 110°C με την προσθήκη τσιμέντου αυξάνεται στα 7.42MPa αλλά με την προσθήκη μπεντονίτη αυξάνεται περισσότερο και φτάνει τα 12.98MPa (διπλασιάζεται). Με την αύξηση της θερμοκρασίας η αντοχή του με τσιμέντο είναι ίση με 7.49MPa, ενώ με μπεντονίτη 14.81MPa, που σημαίνει ότι με το μπεντονίτη αυξάνεται περισσότερο η αντοχή του. Συνεπώς, το υλικό συμπεριφέρεται καλύτερα με την προσθήκη μπεντονίτη. Ακόμα, η αντοχή του με τσιμέντο δεν αυξάνεται ιδιαίτερα με την αύξηση της θερμοκρασίας (από 7.42MPa φτάνει τα 7.49MPa), ενώ χωρίς συνδετικό ή με την προσθήκη μπεντονίτη φαίνεται να επιδρά στην αντοχή του.

Η μέθοδος της εκχύλισης με θειικό οξύ (H₂SO₄) έγινε για την ανάκτηση Ni από πτωχό μετάλλευμα και παρατηρήθηκε ότι πράγματι το Ni ανακτάται συναρτήσει του χρόνου. Συγκεκριμένα, για την πέμπτη μέρα της εκχύλισης ανακτάται Ni στα κλάσματα +0.106mm και -0.106mm κατά 30.72% και 36.45% αντίστοιχα, ενώ για την δέκατη έβδομη μέρα, ανακτάται Ni στα +0.106mm και -0.106mm κατά 53.87% και 62.02% αντίστοιχα. Όπως είναι φανερό, με το πέρασμα του χρόνου αυξάνεται το ποσοστό της ανάκτησης του Ni ενώ αυτή των Fe και Al μένει σε μικρά επίπεδα, επιτυγχάνοντας έτσι εκλεκτική διαλυτοποίηση. Από κάποιο σημείο και μετά δεν ανακτώνται περισσότερο τα στοιχεία γιατί καταναλώνεται το οξύ και τελειώνει το στοιχείο προς διαλυτοποίηση. Ο συνδυασμός της διαδοχικής θραύσης με την εκχύλιση δίνει μία τελική ανάκτηση: $30 + (100 - 30) \times 0.55 = 68.5\%$, σε σύγκριση με το 55% που λαμβάνεται αν το υλικό πάει όλο για εκχύλιση. Σε σύγκριση με τη σημερινή μέθοδο επεξεργασίας, που όλο το υλικό πάει στην πυρομεταλλουργία, η παρούσα μέθοδος δίνει ένα πλεονέκτημα όσον αφορά την υψηλότερη ποιότητα τροφοδοσίας με αντίστοιχη μείωση του κόστους παραγωγής. Αλλά το υπόλοιπο χονδρό υλικό που θα πρέπει να υποστεί υδρομεταλλουργική εκχύλιση έχει ακόμη μεγάλο ποσοστό του συνόλου.

6.3 Προτάσεις

Έχοντας ως βάση τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας, θα μπορούσε να διερευνηθεί ο εμπλουτισμός του λατερίτη με βέλτιστες συνθήκες εμπλουτισμού καθώς και με την χρήση άλλων μεθόδων που δεν χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι, προτείνεται να πραγματοποιηθεί λειοτρίβηση σε ραβδόμυλο από την αρχή αντί να θραυτεί διαδοχικά, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη αποδέσμευση των ορυκτών σε μικρότερα μεγέθη κόκκων. Κατά αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί η διάσπαση της συνδετικής ύλης από τον αιματίτη και τον χαλαζία λόγω του ότι στη λειοτρίβηση σε ραβδόμυλο ασκούνται περισσότερες δυνάμεις τριβής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- [1] Αγατζίνη-Λεονάρδου, Σ. (2004). "Ειδικά θέματα Υδρομεταλλουργίας", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [2] Αλεβίζος, Γ. (1997). "Ορυκτολογία, γεωχημεία και γένεση ιζηματογενών νικελιούχων σιδηρομεταλλευμάτων Λοκρίδας (Κεντρική Ελλάδα)", Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [3] Δρακάκης, Δ. (2000). "Εμπλουτισμός αυτόχθονου λατερίτη της περιοχής
 Καστοριάς", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [4] Κορωναίος, Α. και Πουλάκος, Γ. (2006). "Τεχνικά υλικά", τόμος 4, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [5] Κωστάκης, Γ. (1988). "Κεφάλαια ακτινοσκοπίας των κρυστάλλων",
 Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [6] Μαρτίνη, Σ. (2004). " Έρευνα αποδέσμευσης και εμπλουτισμού νικελιούχου λατερίτη Ευβοίας ", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [7] Μούσουλος, Λ. (1973). "Μεταλλουργία του νικελίου", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [8] Σκλαβούνος, Μ. (1999). "Διερεύνηση της δυνατότητας εμπλουτισμού σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος της περιοχής Ευβοίας", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

- [9] Σταμπολιάδης, Η. και Τζαχρήστα, Β.(1996). "Μελέτη εμπλουτισμού του σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος του κοιτάσματος Κωπαιΐδος", Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [10] Σταμπολιάδης, Η. (2004). " Μηχανική των τεμαχιδίων ", Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [11] Σταμπολιάδης, Η. (2006). " Εμπλουτισμός μεταλλευμάτων ", Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [12] Τσετσέκου, Α. (2008). "Κεραμικά", Σημειώσεις του μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [13] Φασματοσκοπία Ατομικής Απορρόφησης, (1993), Σημειώσεις Εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Διεθνής

- [14] Agatzini-Leonardou S., Zafiratos I. (2004), "Benefication of a Greek serpentinic nickeliferous ore. Part II. Sulphuric acid heap and agitation leaching", Athens, Greece.
- [15] McDonald R.G., B.I Whittington (2007), "Atmospheric acid leaching of nickel laterites review. Part I. Sulphuric acid technologies.Hydrometallurgy", Karawara, Perth, Western Australia.

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- [a] http://www.wikipedia.gr
- [b] http://www.inomak.gr/AISI_304_report_gr.htm
- [c] http://www.kathimerini.gr
- [d] http://www.kitcometals.com/
- [e] http://www.ntua.gr/vitruvius/edu.htm
- [f] http://www.larco.gr
- [g] http://el.wikipedia.org/
- [h] http://www.mred.tuc.gr/p0132011.htm

ПАРАРТНМА

1. Ακτινοδιαγράμματα από το περιθλασίμετρο (XRD)



Σχήμα 1: Ακτινοδιάγραμμα του κλάσματος -0.106mm



Σχήμα 2: Ακτινοδιάγραμμα του πολύ μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +0.3 -1mm



Σχήμα 3: Ακτινοδιάγραμμα του ενδιάμεσα μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +0.3 -1mm



Σχήμα 4: Ακτινοδιάγραμμα του μη μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +0.3 -1mm



Σχήμα 5: Ακτινοδιάγραμμα του πολύ μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +2.8 -6mm



Σχήμα 6: Ακτινοδιάγραμμα του ενδιάμεσα μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +2.8 -6mm



Σχήμα 7: Ακτινοδιάγραμμα του μη μαγνητικού προϊόντος του κλάσματος +2.8 -6mm

2. Ταξινόμηση υλικού

Ακολουθούν τέσσερα διαγράμματα για την εύρεση των συντελεστών διόρθωσης f. Από αυτούς τους συντελεστές προκύπτουν οι πραγματικές διάμετροι των κόκκων των κλασμάτων (de). Έτσι, θα προκύψει η κοκκομετρική κατανομή του λεπτόκοκκου υλικού -0.106mm.