

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ &
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ABRASIVE WATER-JET
MACHINING ΣΕ ICE WATER-JET MACHINING ΓΙΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ**

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Εξειδίκευσης

υπό της

Ιωαννίδου Σωτηρίας

ΧΑΝΙΑ 2004

Η Διατριβή της Ιωαννίδου Σωτηρίας εγκρίνεται από τους καθηγητές:
κ. Μπιλάλη Νικόλαο, κ. Κουϊκόγλου Βασίλειο, κ. Τσουρβελούδη Νικόλαο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Νίκο Μπιλάλη που ήταν κι ο επιβλέπων καθηγητής αυτής της διατριβής για την πολύτιμη συμβολή του και την καθοδήγησή του στην ολοκλήρωσή της.

Επίσης τους καθηγητές που ενέκριναν αυτή τη διατριβή, κ. Β. Κουικόγλου και κ. Ν. Τσουρβελούδη.

Τους ευχαριστώ όλους για την ανθρώπινη συνεργασία τους.

Τέλος και πάνω απ' όλα ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στήριξε , το σύζυγό μου Γιώργο για τις πολύτιμες συμβουλές του και τη συνεργασία του, τα παιδιά μου που με ανέχθηκαν , την μητέρα μου για τις ευθύνες που ανέλαβε και όλους όσους με βοήθησαν να πραγματοποιήσω αυτό το στόχο μου κάτω από ομολογουμένως δύσκολες καταστάσεις .

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή αναφέρεται στην κατεργασία Ice-Water Jet που αποτελεί μια καινούρια μέθοδο κατεργασίας υλικών που βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.

Είναι μια μέθοδος – τεχνολογία , πολλά υποσχόμενος χώρος για πολλούς μελετητές που τα επόμενα χρόνια θα κατακτήσει ανταγωνιστική θέση στην παραγωγική διαδικασία με σημαντικές εφαρμογές για πολλά υλικά και πολλές κατεργασίες με καλύτερα αποτελέσματα σε παραγωγικότητα , ποιότητα και προστασία περιβάλλοντος.

Η κοπή με δέσμη νερού είναι η τεχνολογία που μετά από 30 χρόνια περίπου μελετών και πειραματικών εφαρμογών σε διαφορετικούς τομείς κέρδισε τη δύσπιστη και απαιτητική βιομηχανική παραγωγή και σήμερα κατέχει ανταγωνιστική θέση στις μη συμβατικές κατεργασίες.

Από την προηγούμενη δεκαετία ξεκίνησε το επόμενο βήμα, η χρήση στοιχείων πάγου στη δέσμη νερού με σκοπό ν' αντικαταστήσει τη δέσμη νερού με λειαντικούς κόκκους (Abrasive Water-Jet Machining). Αναμένεται να κατακτήσει ανταγωνιστική θέση στο χώρο των κατεργασιών στο μέλλον.

Στα κεφ. 1-2 γίνεται σύντομη παρουσίαση της μεθόδου, των αρχών λειτουργίας της, των πλεονεκτημάτων της.

Στο κεφ. 3 ορισμένα από τα μοντέλα της AWJM προσαρμόστηκαν στην IWJM ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν στην κατεργασία αυτή.

Στο κεφ. 4 παρουσιάζονται οι παράμετροι βελτιστοποίησης της μεθόδου. Ορίζονται οι παράμετροι και η επίδρασή τους στην κατεργασία.

Στο κεφ. 5 παρουσιάζεται εφαρμογή μοντέλων σε φρεζάρισμα.

Τέλος, στο κεφ. 6 διατυπώνονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής καθώς και θέματα της κατεργασίας αυτής που απαιτούν περαιτέρω βελτίωση και έλεγχο.

Στους αγαπημένους μου Γιώργο, Δημήτρη, Βασιλική,
Κωνσταντίνο,Κατερίνα και σε όσους έχουν την ευτυχία να ασχολούνται
με την έρευνα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΣΕΛ.
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ιστορική αναδρομή της τεχνολογίας των Water-Jets	1
1.2 Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των Water-Jets	3
1.3 Ειδικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου IWJM (ICE WATER - JET MACHINING)	5
2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ IWJM	6
2.1 Η μετάβαση από το Abrasive Water Jet Machining στο Ice Water Jet Machining	6
2.2 Ταξινόμηση τεχνολογιών με χρήση της μεθόδου Ice-Jet	7
2.2.1 Ice Blasting	8
2.2.2 Cryogenic Ice Jet Machining-Ice Water Jet Machining	11
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ IWJM	16
3.1 Γενικά	16
3.2 Μοντέλα αφαίρεσης όγκου	16
3.2.1 Μοντέλα αφαίρεσης όγκου για όλκιμα υλικά	16
3.2.2 Μοντέλα απομάκρυνσης όγκου για ψαθυρά υλικά	23
3.2.3 Γενικό μοντέλο απομάκρυνσης όγκου	26
3.3 Μοντέλα Διατήρησης Ενέργειας	29
3.3.1 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας δύο παραμέτρων	29
3.3.2 Μοντέλο παλινδρόμησης διατήρησης ενέργειας	31
3.3.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας ημι-εμπειρικό	32
3.3.4 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας για υλικά pre-cracked	33
3.4 Μοντέλα παλινδρόμησης	34
3.4.1 Πολυπαραγοντικά μοντέλα παλινδρόμησης	34
3.4.2 Άλλα μοντέλα παλινδρόμησης	36
3.5 Κινητικό μοντέλο	37
3.6 Αριθμητικά μοντέλα	42
3.6.1 Αριθμητικές προσομοιώσεις	42
3.6.2 Μοντέλο αριθμητικής μεθόδου	45
4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ICE-WATER	

JET MACHINING	47
4.1 Ορισμός των παραμέτρων	47
4.1.1 Παράμετροι διαδικασίας	47
4.1.2 Παράμετροι στόχου	48
4.2 Επίδραση των υδραυλικών παραμέτρων διαδικασίας	50
4.2.1 Επίδραση της πίεσης της αντλίας	50
4.2.2 Επίδραση της διαμέτρου του ακροφυσίου	52
4.3 Επίδραση των παραγόντων κοπή	54
4.3.1 Επίδραση της οριζόντιας κίνησης του ακροφυσίου	54
4.3.2 Επίδραση του αριθμού των περασμάτων (πάσσεων)	56
4.3.3 Επίδραση του μήκους της δέσμης	57
4.3.4 Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης	58
4.4 Επίδραση των παραμέτρων μίξης	60
4.4.1 Επίδραση της διαμέτρου εστίασης	60
4.4.2 Επίδραση του μήκους εστίασης	61
4.5 Επίδραση των παραμέτρων των κόκκων πάγου	62
4.5.1 Επίδραση του ρυθμού ροής της μάζας των κόκκων πάγου	62
4.5.2 Επίδραση της διαμέτρου των κόκκων πάγου	66
4.5.3 Επίδραση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων πάγου	67
4.5.4 Επίδραση του μεγέθους των κόκκων	68
4.5.5 Επίδραση της σκληρότητας των κόκκων πάγου	70
5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ	72
5.1 Εναλλακτικές κατεργασίες με χρήση IWJM	72
5.2 Παράμετροι που βελτιστοποιούνται στο φρεζάρισμα IWJ	72
5.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό αφαίρεσης υλικού	72
5.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το βάθος κοπής	73
5.3 Μοντελοποίηση φρεζαρίσματος με IWJ	74
5.3.1 Γενικό μοντέλο φρεζαρίσματος	74
5.3.2 Αριθμητικό μοντέλο φρεζαρίσματος	76
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ IWJM	79
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή της τεχνολογίας των Water-Jets

Από το 1930 χρησιμοποιήθηκε η δέσμη νερού υψηλής ταχύτητας για την εξόρυξη πετρωμάτων και κάρβουνου στην Αμερική και Ρωσία. Το 1960 μια αμερικανική διαστημική εταιρία χρησιμοποίησε το Water-Jet Machining (WJM) για την κοπή μιας ενισχυμένης ίνας και άλλων σκληρών υλικών που ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες και μηχανικές καταπονήσεις και οι συμβατικές μέθοδοι κοπής τα κατέστρεφαν κατά τη διάρκεια της κοπής. Το 1971 κατασκευάστηκε η πρώτη εργαλειομηχανή από την εταιρία Ingersoll – Rand.

Την δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκε το Abrasive Water-Jet Machining (AWJM). Στη δέσμη νερού προστέθηκαν ειδικές σκόνες – σε μορφή κόκκων. Η μέθοδος αυτή αυξάνει την ταχύτητα κοπής και δίνει τη δυνατότητα κοπής υλικών με αυξημένη σκληρότητα.

Τη δεκαετία του 1990 μελετήθηκε η ιδέα της αντικατάστασης των κόκκων του γειαντικού μέσου στο AWJM με στοιχεία (κόκκους) πάγου. Έτσι αναπτύχθηκε η μέθοδος Ice Water-Jet Machining (IWJM). Η μέθοδος αυτή διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου AWJM προσφέρει όμως επιπλέον ελαχιστοποίηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιδράσεων στους χώρους και τα υλικά κατεργασίας που χρησιμοποιείται. Παρακάτω θα γίνει λεπτομερής παράθεση των πλεονεκτημάτων της μεθόδου (βλ. κεφ.1.3).

Η τεχνολογία των Water-Jets χρησιμοποιείται σχεδόν σ' όλους τους χώρους της σύγχρονης βιομηχανίας, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, διαστημική βιομηχανία, χημική βιομηχανία, τεχνολογία περιβάλλοντος κ.λπ. και να αναφέρουμε ξεχωριστά την ιδιαίτερη ανάπτυξη που γνωρίζει τους χώρους της βιομηχανίας των τροφίμων και της φαρμακευτικής. Ο πίνακας 1.1^[1] δίνει σύντομα μια αναφορά σε βιομηχανικές εφαρμογές της τεχνολογίας water-jet. Γενικά η τεχνολογία water-jet χρησιμοποιείται:

- βιομηχανικοί καθαρισμοί
- επιφανειακές κατεργασίες
- βαφές, στίλβωμα και επικαλύψεις επιφανειών
- υδροκατεδάφιση τσιμέντου
- θρυμματισμό πετρωμάτων
- εργασίες εξόρυξης ορυκτών
- διάτρηση εδάφους και πετρωμάτων
- σταθεροποίηση εδάφους

- απολύμανση
- κατεδάφιση
- ανακύκλωση υλικών
- μηχανουργικές κατεργασίες

Ειδικότερα στον κατασκευαστικό τομέα η τεχνολογία water-jet χρησιμοποιείται

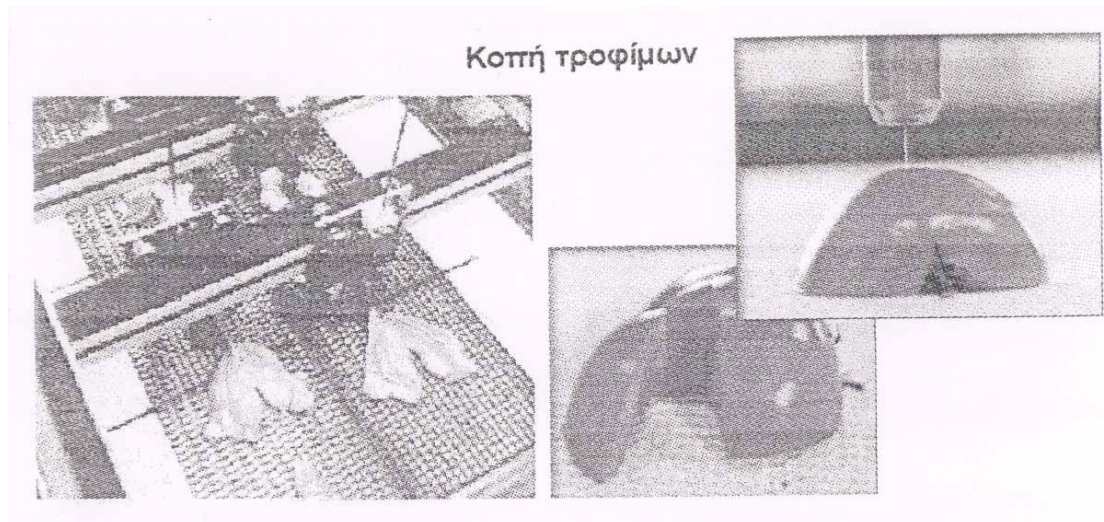
για:

- κοπή υλικών
- γλύφανση επιφανειών
- σφυρηλάτηση επιφανειών
- φρεζάρισμα και τρισδιάστατη διαμόρφωση
- τόννευση
- διάτρηση
- στίλβωση

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Πεδίο εφαρμογής	Εφαρμογή
Civil engineering	Concrete hydrodemolition Surface cleaning Vibration-free demolition Soil Stabilization Soil decontamination Water jet supported pile driving Joint cleaning
Chemical process engineering	Pipeline cleaning and decoating Tube bundle cleaning Vessel, container and autoclave cleaning
Maintenance and corrosion prevention	Coating removal Emission-free surface preparation Selective paint stripping
Municipal engineering	Sewer cleaning
Automotive engineering	Lacquer stripping Engine reconditioning Deburring
Environmental engineering	Material recycling Emission-free decontamination

Παρακάτω μπορούμε να δούμε μερικές βιομηχανικές εφαρμογές όπως στην Βιομηχανία τροφίμων (βλ. σχήμα 1.1) και στην αεροπορική Βιομηχανία (βλ. σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.1 Water-jet στη βιομηχανία τροφίμων.



Σχήμα 1.2 Water-jet στην αεροπορική βιομηχανία

1.2 Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των water-jets

Η κοπή με δέσμη νερού προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κοπής. Συγκεκριμένα παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Προσφέρει πολύ καλή ποιότητα κοπής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό επιτρέπει να κόβονται υλικά τα οποία θα καίγονταν, έλιωναν ή ράγιζαν με τις συμβατικές μεθόδους κοπής. Οι θερμικές κατεργασίες προκαλούν σκλήρυνση της επιφάνειας, παραμορφώσεις και εκπομπή επικίνδυνων αερίων. Αντίθετα τα υλικά που κόβονται με την τεχνική αυτή δεν υφίστανται καμιά θερμική καταπόνηση, αποκλείοντας τέτοια ανεπιθύμητα αποτελέσματα.
- Έχει την ικανότητα να κόβει υλικά ενισχυμένης ίνας, υλικά με ανώμαλες επιφάνειες και τεμάχια κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά, με δυνατότητα να δίνει πολύπλοκα σχήματα (μυτερές γωνίες, πολλαπλές τρύπες κ.λ.π.). Παρά την υψηλή κινητική ενέργεια στην κοπή με δέσμη νερού, αποφεύγονται οι παραμορφώσεις και η μεγάλη ακρίβεια κοπής επιτυγχάνεται χωρίς να δημιουργούνται τριμμένες άκρες ή σπασίματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα εξαιρετικής ποιότητας τελική επιφάνεια που στις περισσότερες περιπτώσεις αποκλείει την ανάγκη φινιρίσματος.
- Μειώνεται σημαντικά ο χρόνος κοπής γιατί δεν χρειάζεται προδιάτρηση ή οποιαδήποτε άλλη επεξεργασία πριν την κοπή.
- Η τεχνολογία water-jet είναι ιδιαίτερα φιλική με το περιβάλλον. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας η κατεργασία είναι καθαρή και δεν δημιουργεί τριβές, ρινίσματα ή επικίνδυνα αέρια που είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για τον άνθρωπο. Δεν χρησιμοποιούνται λιπαντικά κοπής ή γαλακτώματα – γιατί δεν χρειάζονται.
- Παρουσιάζει μεγάλη εξοικονόμηση στην ακατέργαστη ύλη και εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο υλικό με λιγότερη φύρα. Το νερό ανακυκλώνεται και χρησιμοποιείται πάλι ενώ συγκεντρώνονται εύκολα τα απόβλητα για να ανακυκλωθούν.
- Ειδικότερα το AWJM έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας και μπορεί να αντικαταστήσει πολλές απ' αυτές ακόμα και σε περίπλοκες κατεργασίες όπως η κοπή γραναζιών. Ίσως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του AWJM είναι το χαμηλό επίπεδο μηχανικής καταπόνησης που δέχεται το κατεργασμένο τεμάχιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην καταπονείται το τεμάχιο και να μην μειώνεται η μηχανική αντοχή του. Μετά το τέλος της κατεργασίας η επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι καθαρή και λεία και απαιτεί μηδενική σχεδόν περαιτέρω επεξεργασία. Έτσι μπορούν να παραλειφθούν ολόκληρα βήματα της παραγωγικής διαδικασίας, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό το χρόνο και το κόστος παραγωγής.

1.3 Ειδικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου ICE WATER-JET MACHINING

Η μέθοδος IWJM, με το οποίο ασχολούμαστε, ξεπερνά σε πλεονεκτήματα τις προηγούμενες μεθόδους κατεργασίας γιατί είναι μια τεχνολογία ακόμα φιλικότερη στο περιβάλλον και καλύτερη εξοικονόμηση πρώτων υλών. Χρησιμοποιεί νερό το οποίο ανακυκλώνεται, πάγο ο οποίος επανέρχεται στην υγρή κατάσταση ενώ όπου χρησιμοποιείται άζωτο μετατρέπεται στο τέλος της κατεργασίας σε αέριο αφήνοντας μόνο καθαρό απόβλητο από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου χωρίς ίχνη επιμόλυνσης. Το πλεονέκτημα αυτό κατατάσσει την IWJM στις καθαρότερες μεθόδους κατεργασίας για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Εάν συγκρίνουμε τις τεχνολογίες water-jet και πιο ειδικά την IWJM, με τις πιο γνωστές μηχανουργικές κατεργασίες που θεωρούνται πιο αποτελεσματικές σε ποιότητα τελικής επιφάνειας και παραγωγικότητα τότε καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Η κοπή με νερό με στοιχεία πάγου μπορεί να κατεργαστεί πολλά υλικά που το Laser δεν μπορεί, όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο. Δεν καταπονεί το κομμάτι και δεν προκαλεί θερμική διάχυση ή σκλήρυνση του υλικού. Εξασφαλίζει τις ίδιες ή καλύτερες ανοχές απ' την κοπή με Laser, ενώ το κόστος αγοράς αυτών των μηχανών είναι πολύ μικρότερες. Η χρήση μιας τέτοιας μηχανής είναι πολύ πιο ασφαλής σε σχέση με την κοπή με Laser όπου υπάρχουν επιβλαβή αέρια και κίνδυνοι εγκαυμάτων. Όσον αφορά την ποιότητα κοπής ενώ σε λεπτά τεμάχια εμφανίζει τα ίδια αποτελέσματα στα τεμάχια με μεγαλύτερο πάχος εμφανίζει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης η εστίαση της δέσμης νερού δεν χάνεται σε τραχιές επιφάνειες, ενώ επιτρέπει το στοίβαγμα στην τοποθέτηση των τεμαχίων κάτι που τα Laser δεν το επιτρέπουν λόγω υψηλών θερμοκρασιών.

Σε σχέση με την ηλεκτροδιάβρωση (EDM) η κοπή είναι πολύ πιο γρήγορη και μπορεί να επεξεργαστεί οποιοδήποτε υλικό. Δεν χρειάζεται αρχικές τρύπες για να ξεκινήσει η κατεργασία και δεν θερμαίνεται η επιφάνεια των τεμαχίων. Επίσης αγνοεί τις ανωμαλίες στην επιφάνεια των υλικών οι οποίες προκαλούν βραχυκύκλωμα στην ηλεκτρική εκκένωση και επεξεργάζεται μεγαλύτερα σε διάσταση κομμάτια.

Εάν γίνει δε και σύγκριση με τις παραδοσιακές μηχανουργικές κατεργασίες, στη μέθοδο κοπής με δέσμη νερού με στοιχεία πάγου η εγκατάσταση και η τοποθέτηση των κατεργαζόμενων τεμαχίων γίνεται με πιο εύκολο τρόπο στην μηχανή. Είναι πιο εύκολος ο προγραμματισμός της καθοδήγησής της ενώ ο καθαρισμός γίνεται πολύ γρηγορότερα. Στην κατεργασία με νερό δεν γίνεται αλλαγή εργαλείων, γεγονός που μειώνει τους νεκρούς χρόνους της παραγωγικής

διαδικασίας, γεγονός που αποτελεί πρόβλημα προς μελέτη στην κατεργασία σκληρών υλικών.

Όσον αφορά τη χρήση της IWJM στις κατεργασίες καθαρισμού επιφανειών μεγάλες καινοτομίες εμφανίστηκαν. Υδατικά χημικά διαλύματα καθαρισμού και δέσμες ξηρών υλικών χρησιμοποιούνταν για τον καθαρισμό επιφανειών από χρώματα ή επικαλύψεις βρωμιάς και σκόνης. Όλα αυτά τα διαλυτικά και τα χημικά επιλέγονταν σε σχέση με το υλικό και το μέγεθος και το είδος της επικάλυψης και συνδύαζαν υψηλά κόστη και συνθήκες εργασίας επιβλαβείς για τον ανθρώπινο παράγοντα λόγω των αερίων που εκπέμπονταν. Οι δέσμες ξηρών στοιχείων όπως άμμος, γυαλί κ.λ.π. συχνά τραυματίζουν ή καταστρέφουν τα τεμάχια. Από την δεκαετία του 1970 αναπτύχθηκε η ιδέα της αντικατάστασης αυτών των μεθόδων με χρήση δέσμης ξηρού πάγου, ενώ στις αρχές της δεκαετίας του 1980 χρησιμοποιήθηκε βιομηχανικά.

Η χρήση της IWJM επεκτάθηκε και πέρα από την κοπή στις εναλλακτικές κατεργασίες όπως φρεζάρισμα και τόννευση με επιτυχία και πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα αφού πρόκειται για σύγχρονο τομέα έρευνας και πειραματικών εφαρμογών για τον οποίο ενδιαφέρθηκαν πολλοί ερευνητές. Πληθώρα μοντέλων ορισμένα από τα οποία θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία έχουν δημοσιευτεί πάνω στους παράγοντες βελτιστοποίησης των αποδόσεων της μεθόδου αυτής.

2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ICE WATER-JET MACHINING

2.1 Η μετάβαση από το Abrasive Water Jet Machining στο Ice Water-Jet Machining

Με το πέρασμα στον 21^ο αιώνα, η κατάσταση στις μηχανουργικές κατεργασίες και γενικά στις κατεργασίες διαμόρφωσης προϊόντων άλλαξε ριζικά. Οι παραδοσιακές τεχνικές αντικαταστάθηκαν από νέες τεχνολογίες όπως η κοπή με νερό και με λειαντικά μέσα (AWJM).

Σήμερα η AWJM βρίσκει εφαρμογές σε κατεργασίες μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών όπως ο χυτοσίδηρος, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός, το τιτάνιο και τα κράματά του, οι ενανθρακωμένοι χάλυβες, οι χάλυβες εργαλείων, τα κεραμικά, τα σύνθετα υλικά κ.λ.π. Η προσαρμοστικότητα της κατεργασίας αυτής την κάνει ικανή εκτός από απλή κατεργασία κοπής τροχιάς, να κατεργαστεί τεμάχια με μεθόδους όπως η διάτρηση, το φρεζάρισμα, η τόννευση, η σπειροτόμηση, ο καθαρισμός κ.λ.π.

Η βασική έρευνα και ανάπτυξη στην περιοχή AWJM αναπτύχθηκε κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες όπου και το International Society of Water Jet Technology (ISWJT) και η έρευνα έχει προαχθεί ιδιαίτερα από 5 Πανεπιστημιακά Εργαστήρια: University of Kentucky, University of Washington, University of Rhode Island, New Jersey Institute of Technology και University of Missouri-Rolla καθώς και από μια βιομηχανία την Quest Integrated Inc. Οργανισμοί όπως η Boeing, η NASA, η Pratt & Whitney, η U.S. Air Force και άλλοι κατασκευαστές διεξάγουν αυτοδύναμη έρευνα σ' αυτή τη γνωστική περιοχή, αξιοποιώντας τα αποτελέσματά της για κάλυψη εσωτερικών αναγκών.

Εκτός από τα Πανεπιστήμια της Αμερικής σήμερα όλο και περισσότερα Ευρωπαϊκά Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Ινστιτούτα όπως και Πανεπιστήμια της Αυστραλίας (Πανεπιστήμιο Swinburne και Ερευνητικό Ινστιτούτο I.R.I.S.) ασχολούνται ερευνητικά. Η βασική έρευνα στην περιοχή του AWJM είχε τέσσερις διαφορετικές κατευθύνσεις.

- Έρευνα για την κατανόηση του μηχανισμού της κατεργασίας
- Έρευνα όσον αφορά τις εφαρμογές της κατεργασίας
- Έρευνα στα συστήματα, στην ευαισθησία, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κατεργασίας.
- Ανάπτυξη νέων εφαρμογών–παραλλαγών για κάλυψη μεγαλύτερου φάσματος εφαρμογών της μεθόδου.

Η μελέτη έδωσε τη δυνατότητα της προσέγγισης νέων καινοτόμων μεθοδολογιών εφαρμογής της τεχνολογίας κοπής με δέσμη νερού όπως το Ice-Jet Machining, το Cryogenic Jet Machining, τα υβριδικά συστήματα κατεργασιών και η στίλβωση και ο καθαρισμός με χρήση δέσμης ξηρού πάγου (Ice-blasting).

2.2 Ταξινόμηση τεχνολογιών με χρήση της μεθόδου Ice-Jet

Με βάση τη σύγχρονη έρευνα οι τεχνολογικές εφαρμογές του πάγου σημειώνουν μεγάλη ανάπτυξη και γίνονται πολλές πειραματικές εφαρμογές. Τα στοιχεία του πάγου επιταχύνονται από την είσοδό τους σε δέσμη ρευστού (ρεύμα αέρα, νερό σε υγρή μορφή, CO₂), με την εφαρμογή περιστρεφόμενων κοπτικών λεπίδων, εκτόνωση του ρευστού μέσου κ.λ.π. Η δέσμη αέρα με πάγο (ice-air jet) αντικαθιστά την εκτόξευση άμμου (αμμοβολή) και η δέσμη νερού με πάγο (ice-water jet) αντικαθιστά τη δέσμη νερού με λειαντικό μέσο (abrasive-water jet). Με βάση αυτά τα αποτελέσματα βελτιώνονται κι εξελίσσονται όλες οι τεχνικές για επιφανειακή επεξεργασία και κατεργασία.

Εκείνο που ωθεί την έρευνα είναι τα σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης του πάγου και πάνω απ' όλα η πλήρης προστασία από κάθε ρυπαντικό μέσον.

Η σύγχρονη έρευνα στρέφεται στο να βελτιωθούν οι παραγωγικοί ρυθμοί έτσι ώστε και τεχνολογικά αλλά και οικονομικά να γίνουν ανταγωνιστικές οι μέθοδοι αυτές.

Ανάλογα με το ρευστό μέσο της δέσμης μέσα στην οποία εκτοξεύονται οι κόκκοι πάγου διαχωρίζονται σε (βλ. πίνακα 2.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ICE-JET

Μέσο ροής Ice-Jet	
Αέρας	Νερό
Ice-blasting	Ice water- Jet Machining Cryogenic Jet Machining

2.2.1 Ice-blasting

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980 για να ξεπεραστούν τα προβλήματα που συνδέονται με τον καθαρισμό τεμαχίων. Προσπαθούσαν να βρουν τρόπο να αποφύγουν τον κίνδυνο εγκλωβισμού άμμου από την αμμοβολή και τα επικίνδυνα αέρια από τη χρήση τοξικών χημικών διαλυτών, όπως επίσης και τον εγκλωβισμό υγρασίας ή τη διάβρωση από τη ρίψη νερού.

Η πρώτη μονάδα που χρησιμοποίησε ξηρό πάγο σε νιφάδες για καθαρισμό διατέθηκε για εμπορική χρήση το 1985 πειραματικά στην αγορά κι άρχισε να πωλείται το 1987.

Σήμερα υπάρχουν τέσσερις εταιρίες που κατασκευάζουν τέτοιο εξοπλισμό. Η διαδικασία αυτή λειτουργεί με νιφάδες από στερεό διοξείδιο του άνθρακα CO₂ σε θερμοκρασία -78,5°C. Η παραγωγή αυτή του CO₂ μπορεί να θεωρηθεί υποπροϊόν της παραγωγής αμμωνίας, λαδιού, καθαρισμού αερίων και παραγωγής αιθανόλης. Επίσης βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες στο υπέδαφος (βλ. σχ.2.1).

Υποβάλλοντας το CO₂ σε πίεση 1 bar και θερμοκρασία -80°C παράγεται ξηρός πάγος. Πρεσάρεται μέσω μιας μήτρας και παράγονται νιφάδες κυλινδρικού σχήματος διαμέτρου 1-6mm μήκος από 5-15mm (βλ. σχήμα 2.2). Οι παράμετροι που επηρεάζουν την διαδικασία του καθαρισμού είναι η πυκνότητα, η σκληρότητα, η τραχύτητα της επιφάνειας και το σχήμα των νιφάδων. Η σκληρότητα κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3 Mohs όμοια με το γύψο.

Δεν υπάρχουν κατάλοιπα μετά την κατεργασία γιατί ο ξηρός πάγος όταν προσκρούει στην επιφάνεια επιστρέφει στην αέρια κατάσταση. Αυτό είναι και το σημαντικότερο πλεονέκτημα αφού δεν υπάρχουν κατάλοιπα ούτε στις τρύπες ούτε

στις κοιλότητες των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Η κατεργασία εμφύσησης ξηρού πάγου είναι ελαφρά διαβρωτική και ευέλικτη όσον αφορά τα διαφορετικά υλικά των τεμαχίων.

Από τη μια πλευρά μειώνει τον όγκο των αποβλήτων, σε σχέση με την αμμοβολή ή τις χημικές διαδικασίες, κι έτσι μειώνει το κόστος απομάκρυνσης αποβλήτων. Από την άλλη πλευρά, εξοικονομείται παραγωγικός χρόνος αφού εφαρμόζεται χωρίς να χρειάζεται προηγουμένως να απομακρυνθούν τα ευαίσθητα μέρη. Οι χρόνοι κατεργασίας είναι μικρότεροι απ' την αμμοβολή. Έχει υπολογιστεί πειραματικά ότι όταν καθαρίζονται καλούπια εξοικονομείται χρόνος κατά 50%-75% κι επίσης τα καλούπια παρατείνουν το χρόνο της λειτουργικής ζωής τους αφού η μέθοδος δεν τα καταπονεί.

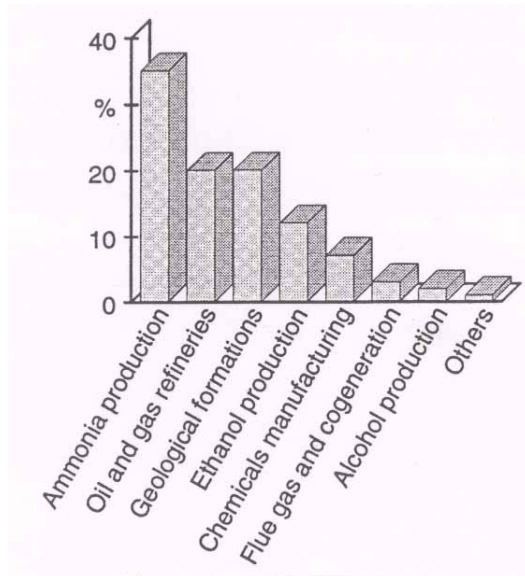
Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι επειδή δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένη υποβάλλει τους χειριστές σε ακραίες συνθήκες εργασίας. Ο θόρυβος μετρήθηκε πάνω από 125 dB(A) σε συσκευή η οποία δεν ήταν ερμητικά κλειστή. Γι' αυτό και πρέπει πάντα να υπάρχει συσκευή ερμητικά κλειστή και μέσα προστασίας της ακοής. Επίσης πρέπει να απάγεται απ' το χώρο εργασίας η συγκέντρωση CO₂ στον περιβάλλοντα χώρο.

Χρησιμοποιείται για καθαρισμό σε πυρηνικά εργοστάσια, στη ναυπηγοεπισκευαστική, όπως για τον αποχρωματισμό, καθαρισμό κατά τη συντήρηση αεροπλάνων, τραίνων, για τον καθαρισμό τυπογραφικών μηχανών, σωληνώσεων και για την απομάκρυνση ρητινών, πρόσθετων, λαδιών, λιπών κ.λ.π. από μηχανολογικά εξαρτήματα.

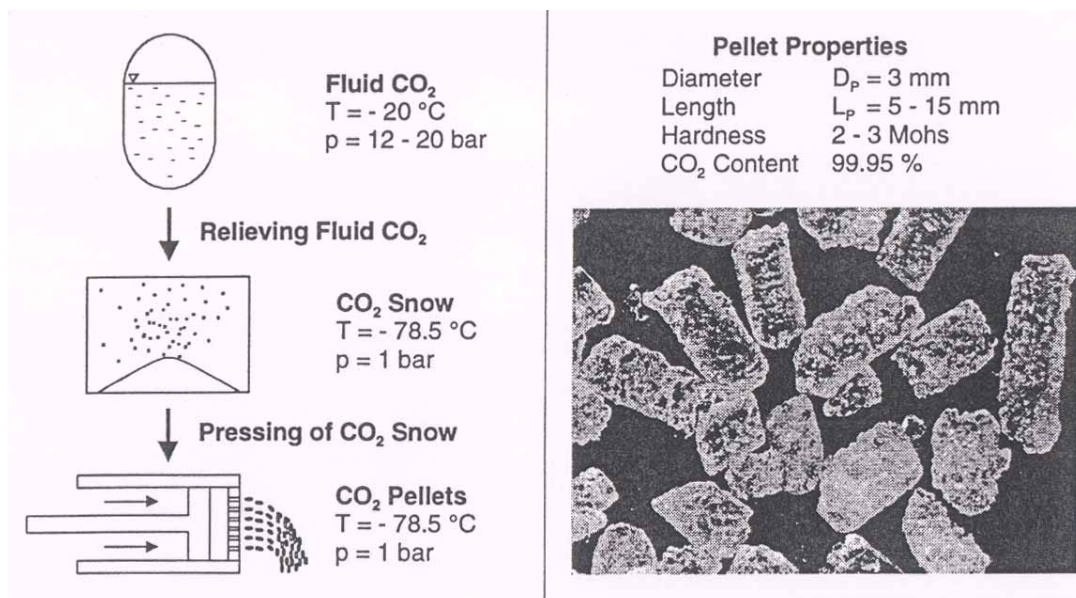
Η λειτουργία της μεθόδου φαίνεται σχηματικά στο σχ.2.3 όπου: κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, οι νιφάδες συλλέγονται σε αποθηκευτικό χώρο και σε ρεύμα αέρα μέσω μιας τροφοδοσίας. Το ρεύμα αέρα παράγεται από ένα πνευματικό σύστημα που περιλαμβάνει συμπιεστή, ξηραντήρα και ψυκτικό μέσον. Οι νιφάδες επιταχύνονται μέσω ρεύματος πεπιεσμένου αέρα σε ένα ακροφύσιο. Η δέσμη φτάνει να έχει πίεση 3-12 bar και μέγιστο ρυθμό ροής όγκου 11 m³/min, αλλά εξαρτάται από την εφαρμογή ενώ εγκαταλείπει το ακροφύσιο σχεδόν με την ταχύτητα του ήχου.[2]

Στο σχήμα 2.4 μπορούμε να δούμε φωτογραφία συσκευής ice-blasting.

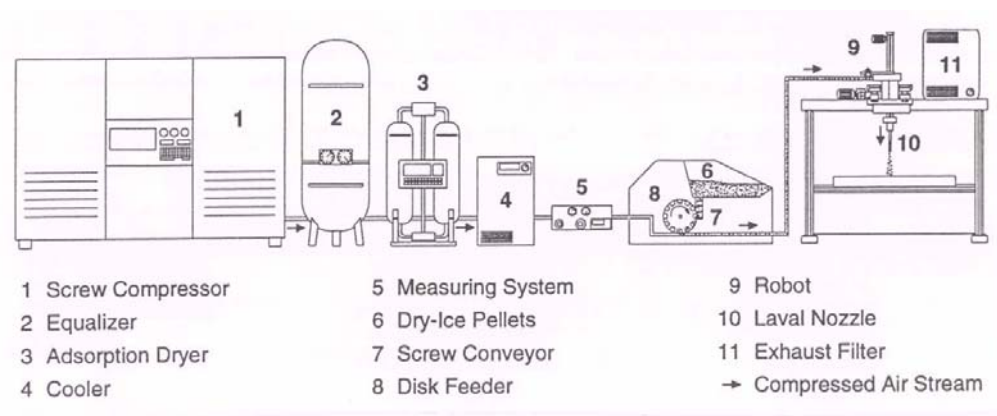
Δεν θα προχωρήσουμε στη μελέτη των μοντέλων που αναπτύχθηκαν για τη μέθοδο αυτή γιατί δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας.



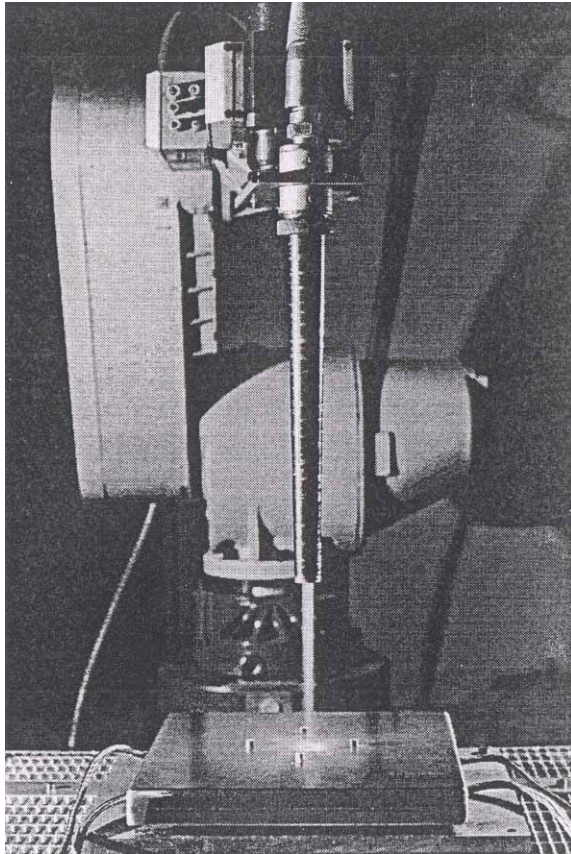
Σχήμα 2.1 Κατανομή των πηγών στην συνολική παραγωγή CO₂



Σχήμα 2.2 Παραγωγή και ιδιότητες των κυλινδρικών κόκκου ξηρού πάγου



Σχήμα 2.3 Σχεδιασμός συστήματος dry - ice blasting



Σχήμα 2.5 Συσσκευή ice-blasting

2.2.2 Cryogenic Ice Jet Machining –Ice Water Jet Machining

Ήδη από το 1982 αρκετοί ερευνητές όπως Galeski, Vickers, Trunhot κ.α. ασχολήθηκαν με την εξέταση του ψυχρού ρεύματος και της παροχής πάγου στο ρεύμα νερού. Στις μελέτες αυτές αποδείχθηκε ότι η προσθήκη τεμαχίων πάγου στο ρεύμα νερού βελτίωσε την ποιότητα κοπής μαλακών υλικών σε σύγκριση με τη συμβατική δέσμη απλού νερού.

Οι Dupoky και Hashish, το 1996, προσπάθησαν να εξελίξουν το AWJ χρησιμοποιώντας αντί για νερό, υγρό άζωτο. Η μέθοδος ονομάστηκε abrasive-cryogenic jet. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το abrasive cryogenic jet είχε την ίδια παρουσία με το abrasive water jet αλλά χωρίς να αφήνει κατάλοιπα υγρού στο τεμάχιο μετά το πέρας της κατεργασίας. Η μέθοδος όμως είχε μειονεκτήματα τα οποία ήταν:

- με την παρουσία αντλιών τεχνολογίας cryogenic ήταν οικονομικά ασύμφορο να επιτυγχάνουν υψηλή πίεση και υψηλό ρυθμό ροής ενώ ταυτόχρονα να μπορούν να διατηρούν και την cryogenic θερμοκρασία. Η χρήση της μεθόδου ήταν οικονομικά συμφορότερη σε εφαρμογές χαμηλής πίεσης.

- το υγρό άζωτο είναι πιο ακριβό απ' το νερό και χρειάζονταν αρκετά μεγάλη ποσότητα για να ολοκληρωθεί η κατεργασία. Έτσι το κόστος κατεργασίας αυξάνονταν ακόμα περισσότερο.
- μετά το πέρας της κατεργασίας παρέμενε στην επιφάνεια του τεμαχίου μια ποσότητα από το λειαντικό μέσο. Έτσι για ορισμένες εφαρμογές χρειάζονταν επιπλέον καθάρισμα.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα μελετήθηκαν διεξοδικά. Έπρεπε να μελετήσουν την δέσμη του απλού νερού και να αυξήσουν την αποτελεσματικότητά της χωρίς τη χρήση λειαντικού μέσου. Αυτό μπορεί να γίνει με την αντικατάσταση των λειαντικών κόκκων από κόκκους πάγου και να δημιουργήσουν δέσμη πάγου.

Η σκληρότητα του πάγου είναι μικρότερη απ' αυτή των σκληρών λειαντικών μέσων που χρησιμοποιούνταν στη συμβατική τεχνολογία AWJ. Αυτό σημαίνει ότι η δέσμη πάγου δεν μπορεί να είναι το ίδιο αποτελεσματική με την τεχνολογία AWJ κατά την κοπή σκληρών μετάλλων. Όμως η μείωση του κόστους παραγωγής που συνεπάγεται και η ελαχιστοποίηση όλων των αρνητικών περιβαλλοντικών επιδράσεων μπορεί να υπερκαλύψει αυτή τη σχετική μείωση της παραγωγικότητας.

Οι πιο σημαντικές εφαρμογές του ice-jet είναι εκεί όπου απαγορεύεται η ύπαρξη ξένης ουσίας όπως στη βιομηχανία τροφίμων, στα ηλεκτρονικά, στην αεροναυπηγική και άλλους τομείς της βιομηχανίας. Άλλη σημαντική εφαρμογή του ice-jet είναι στη φαρμακοβιομηχανία.

Ο Li και άλλοι ερευνητές, το 1995 ασχολήθηκαν με την βελτίωση της κατεργασίας σκληρών υλικών με στοιχεία πάγου που δημιουργούνται από ψύξη νερού. Η εργασία αυτή παρουσίασε δυσκολίες που σχετίζονταν με την μορφοποίηση του πάγου, το μέγεθος των κόκκων και τη συγκέντρωση σε μια κινούμενη δέσμη όταν αυτή περιορίζεται σ' ένα μικρό ακροφύσιο.

Ο έλεγχος της ψύξης πρέπει να γίνεται με ακρίβεια, πριν από το ακροφύσιο για να αποφεύγεται το «πάγωμα».

Το αρχικό στοιχείο της μορφοποίησης του πάγου ήταν το νερό να ψύχεται μέσα στο ακροφύσιο χρησιμοποιώντας υγρό άζωτο. Η δυσκολία που παρουσιάζονταν ήταν η διαδικασία επιτυχούς μεταφοράς θερμότητας. Η επαρκής ψύξη επιτυγχάνονταν στο στόμιο διαμέτρου 75μm και με πίεση νερού 68MPa. Η ροή του νερού σ' αυτές τις συνθήκες ήταν 0.036 lt/min.

Η δέσμη πάγου διαμορφώνεται με την προσθήκη κόκκων πάγου στο ρεύμα νερού όπως και το λειαντικό μέσον. Για να γίνει αυτό όμως έπρεπε σε προηγούμενο στάδιο να υπάρχει συμβατική παγοποιητική μηχανή για την παραγωγή πάγου και στη συνέχεια μια μηχανή για θρυμματισμό του πάγου. Μετά από δύο στάδια

θρυμματισμού, οι κόκκοι πάγου οδηγούνται από παλινδρομικό τροφοδότη στη δεξαμενή κόκκων πάγου. Αυτό ήταν και το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, ότι δηλαδή απαιτούνταν πολλές επιπρόσθετες συσκευές για να παραχθούν οι κόκκοι πάγου.

Το προτεινόμενο cryogenic jet σύστημα είναι μια πολύ καλή μέθοδος κατεργασίας που συνδυάζει θερμοδυναμικές επιδράσεις της απότομης ψύξης και της μηχανικής δράσης της ελεγχόμενης πρόσκρουσης των κόκκων πάγου. Η κοπή γίνεται με αρχική θραύση (cracking) της επιφάνειας του ψαθυρού υλικού και με γρήγορη διάδοση σ' όλο το υλικό του τεμαχίου εξαιτίας της πρόσκρουσης των κόκκων πάγου στο τεμάχιο με μεγάλη ταχύτητα. Αυτός ο μηχανισμός είναι πολύ πιο γρήγορος απ' το μηχανισμό αφαίρεσης υλικού των λειαντικών στα AWJ συστήματα κι απ' το μηχανισμό διάβρωσης της απλής δέσμης νερού ή της δέσμης υγρού αζώτου.

Το cryogenic jet σύστημα επίσης χρησιμοποιεί cryogenic υγρό άζωτο για να ψύξει τις σταγόνες νερού οι οποίες παράγονται από σύστημα ψεκασμού κι έτσι παράγονται πολύ λεπτοί κόκκοι πάγου. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διάφορα πρόσθετα στο νερό που σκοπό έχουν να κάνουν πιο αποδοτική τη μορφοποίηση των κόκκων του πάγου και να ελαχιστοποιήσουν κατά το δυνατόν το μέγεθός τους.

Στη συνέχεια αυτοί οι κόκκοι πάγου εισέρχονται σε δέσμη νερού υψηλής πίεσης και δημιουργούν το ισχυρό cryogenic ice jet. Ταυτόχρονα, ένα μικρό ποσό υγρού αζώτου κατευθύνεται στο σωλήνα εστίασης ο οποίος έχει δύο διαδρόμους για να ψύξει τοπικά και να κάνει ψαθυρή την επιφάνεια του τεμαχίου.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι:

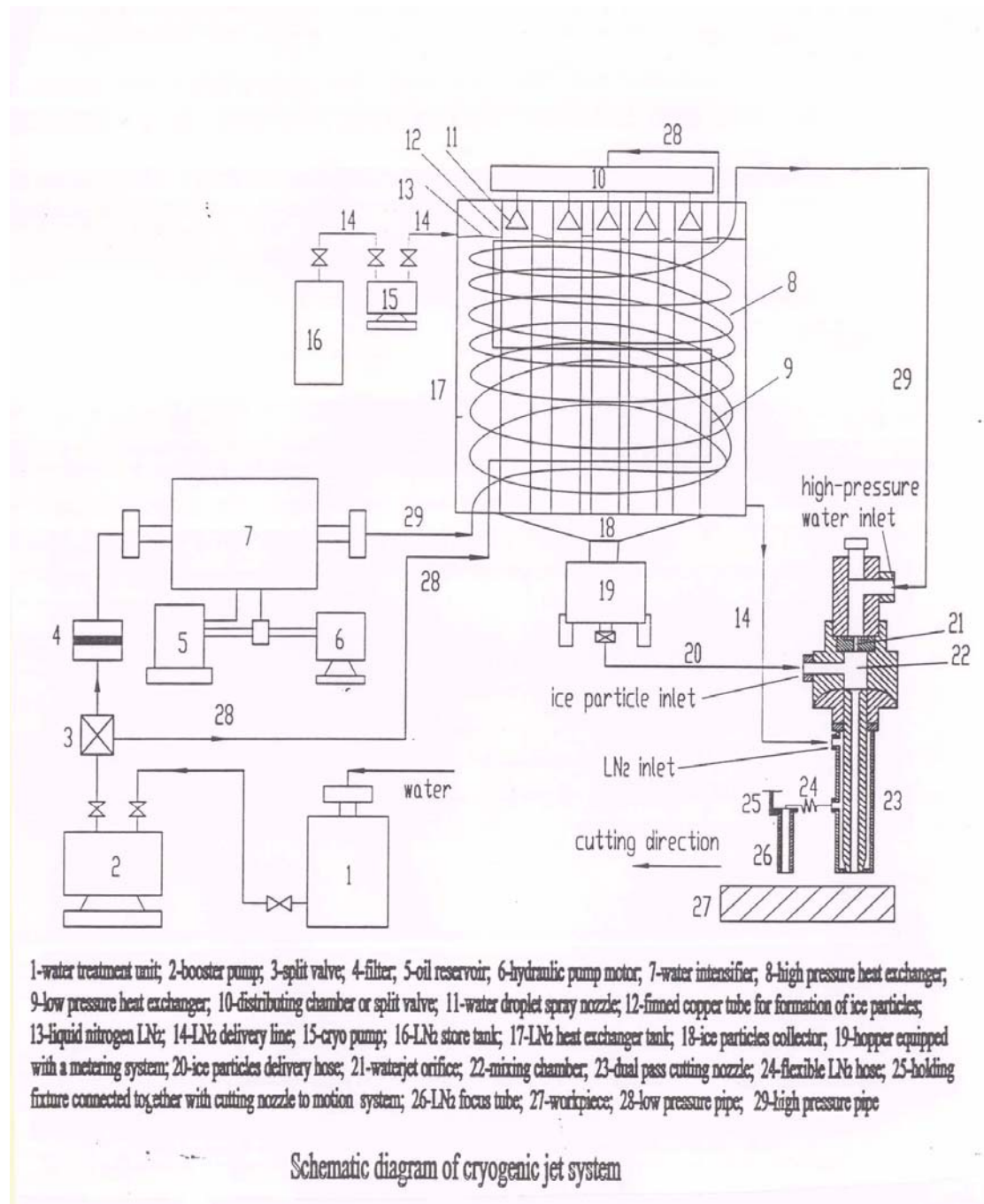
- αποτελεσματική κατεργασία ιδιαίτερα των υλικών που είναι ευαίσθητα στην αύξηση της θερμοκρασίας
- καλύτερη κοπή λόγω του μηχανισμού της προετοιμασίας της επιφάνειας με την ψαθυροποίησή της
- καλύτερη ποιότητα στην επιφάνεια κοπής γιατί η μέθοδος αυτή διαθέτει μηχανισμό ελέγχου του βάθους κοπής αφού μπορεί να ελέγχει το μέγεθος των κόκκων πάγου και τη συγκέντρωσή τους κατά τη διάρκεια της κατεργασίας
- ελαχιστοποίηση της απώλειας πολύτιμων υλικών αφού μπορεί να κάνει τομές μικρού πλάτους
- τα απόβλητα από το υλικό του τεμαχίου μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν αφού το υγρό άζωτο επιστρέφει στην αέρια κατάστασή του και ο πάγος στην υγρή κατάστασή του.

Το χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν παραμένει στο τέλος της κατεργασίας παρά μόνο νερό και αυτό το χαρακτηριστικό προσδίδει στην μέθοδο αυτή την εμπορική του και τεχνολογική αξία. Επίσης προσδίδει στη μέθοδο και τη δυναμική για περαιτέρω εφαρμογές όπως στη βιομηχανία ημιαγωγών, στη φαρμακευτική, στις μικροκατεργασίες, στην βιομηχανία πυρηνικών καυσίμων για επιφανειακό καθαρισμό και μείωση του όγκου των αποβλήτων. Η μεθοδολογία αυτή μπαίνει στη γραμμή παραγωγής.

Για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος cryogenic-ice jet σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροναυπηγική -όπου το πρόβλημα είναι τα υψηλά κόστη και ο χρόνος που χρειάζεται για την παραγωγή εξαρτημάτων- πρέπει να γίνεται σε κάθε περίπτωση προσαρμογή της μεθόδου στις μηχανολογικές εφαρμογές που απαιτείται. Αυτός είναι και ο λόγος που κάθε οργανισμός ή επιχείρηση βελτιστοποιεί ή αναπτύσσει μια διαδικασία της μεθόδου μεμονωμένα ανάλογα με τις απαιτήσεις της. Ωστόσο για να προάγονταν η έρευνα και να είχαμε βελτιστοποίηση της μεθόδου συνολικά θα έπρεπε να συνεργάζονταν οι επιχειρήσεις και να ανταλλάσσουν τις εμπειρίες τους και τις προτάσεις τους.

Η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος cryogenic ice-jet φαίνεται στο σχήμα 2.5.

Χρησιμοποιείται διπλό ενισχυτικό σύστημα αντλιών με πίεση λειτουργίας πάνω από 55,000 psi (ή 380 MPa). Η κίνηση του ακροφυσίου ελέγχεται αριθμητικά μέσω ενός αναρτημένου υπολογιστή με σύστημα θέσεων πολλαπλών αξόνων. Για να ολοκληρωθεί το Hardware, σχεδιάζεται, κατασκευάζεται και ελέγχεται μια μονάδα εναλλάκτη θερμότητας, σύστημα παραλαβή πάγου/υγρού αζώτου και ακροφύσιο διπλής εξόδου.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα cryogenic jet συστήματος

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ IWJM

3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η μέθοδος IWJM είναι μια μέθοδος που βασίστηκε ερευνητικά και πειραματικά στην προκάτοχό της την AWJM χωρίς να μπορούμε να πούμε ότι την αντικατέστησε πλήρως. Χρησιμοποιεί λοιπόν τα μοντέλα που την περιγράφουν με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα μοντέλα που περιγράφουν τη μέθοδο όσο το δυνατόν εκτενέστερα (για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας) χωρίς να μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η διεθνής έρευνα στο πεδίο αυτό ολοκληρώθηκε αφού και σήμερα αποτελεί πόλο ιδιαίτερου ερευνητικού ενδιαφέροντος.

Θα ασχοληθούμε με τα μοντέλα που υπολογίζουν το βάθος κοπής. Τα μοντέλα σύμφωνα με τους Momber, Kovacevic [6] χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες:

- μοντέλα αφαίρεσης όγκου (volume-displacement models)
- μοντέλα διατήρησης ενέργειας (energy-conservation models)
- μοντέλα παλινδρόμησης παραμέτρων (parameter-regression models)
- αριθμητικές προσομοιώσεις (numerical simulations)

Τα μοντέλα δεν αναπτύσσονται πλήρως, αλλά για περισσότερες πληροφορίες μπορεί ο ενδιαφερόμενος ν' ανατρέξει στην αντίστοιχη βιβλιογραφία. Ωστόσο, οι τελικές εξισώσεις παρουσιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε ν' αναφέρονται οι περισσότερες απ' τις εμπειρικές παραμέτρους και τις παραμέτρους παλινδρόμησης των μοντέλων.

3.2 Μοντέλα αφαίρεσης όγκου

3.2.1 Μοντέλα αφαίρεσης όγκου για όλκιμα υλικά

Η βασική υπόθεση των μοντέλων που υπάρχουν σ' αυτή την ομάδα είναι ότι ο ρυθμός αφαίρεσης όγκου που υπολογίζεται φυσικά είναι ισοδύναμος με τον ρυθμό απομάκρυνσης που υπολογίζεται γεωμετρικά.

Η υπόθεση αυτή ισχύει για σταθερή κατάσταση αφαίρεσης όγκου υλικού.

$$d\dot{V}_M = d\dot{V}_D \quad (3.1)$$

όπου: V_M = ρυθμός αφαίρεσης όγκου υλικού

V_D = ρυθμός απομάκρυνσης υλικού

Αν ακολουθήσουμε το μοντέλο του Hashish [7] θα δούμε ότι το συνολικό βάθος κοπής h δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$h = h_c + h_d \quad (3.2)$$

όπου: h_c = το βάθος κοπής υλικού από κόκκους πάγου που προσκρούουν με πολύ μικρή γωνία πρόσκρουσης στην περιοχή που ονομάζεται «ζώνη φθοράς λόγω κοπής».

h_d = το βάθος κοπής υλικού από κόκκους που προσκρούουν με μεγάλες γωνίες στην περιοχή που ονομάζεται «ζώνη παραμόρφωσης»

Ας δούμε τη μελέτη του βάθους κοπής με πολύ μικρή γωνία πρόσκρουσης (h_c).

Χρησιμοποιούμε την συνθήκη σταθερής κατάστασης αφαίρεσης όγκου υλικού (3.1) και την ανάλυση του Finnie [8] για μικροκατεργασίες μικρού βάθους.

$$d\dot{V}_M = \frac{7}{\pi} \left[\frac{R_f^3 \cdot dm_A}{\rho_p} \right] \cdot \left[\frac{v_P}{v_C} \right]^{2.5} \cdot \sin 2\varphi \cdot \sqrt{\sin \varphi} \quad (3.3)$$

όπου: V_M = ρυθμός αφαίρεσης όγκου

R_f = παράμετρος στρογγυλότητας

m_A = ρυθμός ροής κόκκων πάγου

ρ_p = πυκνότητα κόκκων πάγου στη δέσμη

v_P = ταχύτητα κόκκου

v_C = χαρακτηριστική ταχύτητα κόκκου

φ = γωνία πρόσπτωσης δέσμης

Η χαρακτηριστική ταχύτητα κόκκου, δίνεται από τη σχέση:

$$V_C = \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_f \cdot R_f^{3/5}}{\rho_p}} \quad (3.4)$$

όπου σ_f = τάση ροής υλικού - στόχου

R_f = παράμετρος στρογγυλότητας

Αν στη σχέση (3.3) ασχοληθούμε με μικρές ταχύτητες πρόσπτωσης τότε προκύπτει η σχέση:

$$d\dot{V}_M = \frac{14 d\dot{m}_A}{\pi P_P} \cdot \left[\frac{v_P}{v_C} \right]^{2.5} \cdot \phi^{1.5} \quad (3.5)$$

Από τη γεωμετρία της μεθόδου κοπής όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1

$$d\dot{V}_D = dh \cdot v \cdot d_{jet} \quad (3.6)$$

όπου: v = οριζόντια μετακίνηση ακροφυσίου

d_{jet} = διάμετρος δέσμης

Αν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις (3.5) και (3.6) στην (3.1) και θέσουμε

$d\dot{m}_A = \dot{m}_A \cdot dx / d_{jet}$ (όπως φαίνεται από το σχήμα 3.1) και λύσουμε την εξίσωση ως προς dh και ολοκληρώσουμε τότε προκύπτει:

$$hc = \frac{c_1 d_{jet}}{2.5} \cdot \left[\frac{14 \cdot \dot{m}_A}{\pi \cdot \rho_P \cdot v \cdot d^2_{jet}} \right]^{0.4} \cdot \left[\frac{v_P}{v_C} \right] \quad (3.7)$$

όπου $c_1 = 1 - \phi_o / \phi_{cr}$ η οποία είναι μια παράμετρος η οποία εξαρτάται απ' τη γωνία πρόσπτωσης του κόκκου πάγου (σχ.3.1).

Επίσης μπορούμε για απλοποίηση να αντικαταστήσουμε το d_{jet} με d_F που είναι η διάμετρος εστίασης.

Η ταχύτητα των κόκκων του πάγου v_P , εξαρτάται από το βάθος κοπής. Εξαιτίας της τριβής στα τοιχώματα και της απόσβεσης, η ταχύτητα των κόκκων μειώνεται σε βαθύτερες περιοχές κατά την κοπή.

Για να βρούμε τη συνάρτηση που δίνει την ταχύτητα των κόκκων του πάγου θα χρησιμοποιήσουμε μια απλή εξισορρόπηση ροπών σ' έναν όγκο ελέγχου που δεν λαμβάνει υπ' όψη την επίδραση του εισερχόμενου αέρα μας δίνει:

$$\left(\dot{m}_w + \dot{m}_A \right) \cdot v_P(h) = \left(\dot{m}_w + \dot{m}_A \right) v_P(h=0) - F_f \quad (3.8)$$

όπου: m_w = ρυθμός ροής της μάζας νερού

F_f = δύναμη τριβής στα τοιχώματα

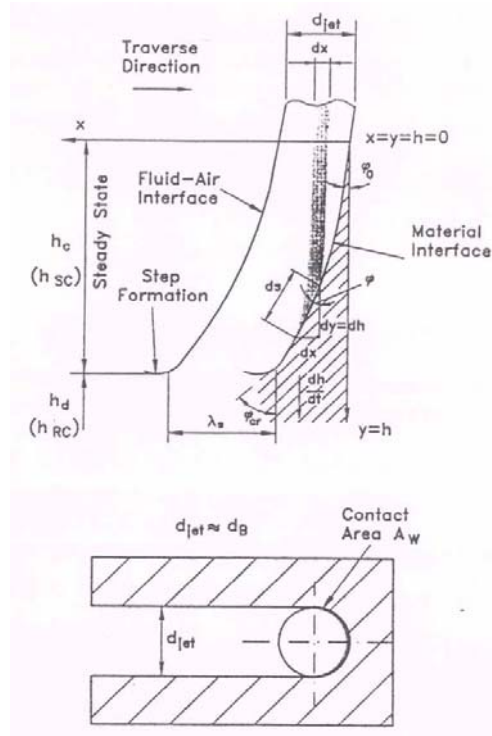
ενώ η δύναμη τριβής δίνεται από τη σχέση

$$F_f = C_f \cdot A_w \cdot \frac{\rho_{jet}}{2} v_P^2 \quad (3.9)$$

όπου: C_f = σταθερά τριβής

A_w = περιοχή επαφής μεταξύ της δέσμης ροής και της εγκοπής

ρ_{jet} = πυκνότητα δέσμης ροής.



Σχήμα 3.1 Γεωμετρική αποτύπωση κατά τη διάρκεια IWJM

Περαιτέρω μπορούμε να υπολογίσουμε την επιφάνεια επαφής (A_w) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.

$$A_w = \frac{\pi \cdot d_{jet} \cdot h}{2} \quad (3.10)$$

Με συνεχείς αντικαταστάσεις των σχέσεων (3.8), (3.9), (3.10) μπορούμε να προσδιορίσουμε την ταχύτητα των κόκκων πάγου τοπικά (σ' ένα συγκεκριμένο βάθος).

$$v_p(h) = v_p - \left[\frac{\pi \cdot C_f \cdot d_{jet} \cdot \rho_{jet} \cdot v_p^2 \cdot h}{4 \cdot (\dot{m}_A + \dot{m}_W)} \right] \quad (3.11)$$

Για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης των λειαντικών κόκκων σε βαθιά κοπή χρησιμοποιούμε τα μοντέλα των Hashish [9], Blickwedel [10], Bitter [11] για να υπολογίσουμε τον όγκο που απομακρύνεται

$$d\dot{V}_M = \frac{\dot{m}}{2 \cdot \varepsilon_M^{def}} \cdot \left[v_P \cdot \left(1 - \frac{C_f}{d_{jet}} \cdot h \right) - v_{thr} \right]^2 \quad (3.12)$$

όπου: ε_M^{def} = ενέργεια διάβρωσης και σύμφωνα με τον Hashish μπορεί να αντικατασταθεί από σ_f

v_{thr} = κατώφλιο οριζόντιας μετακίνησης

Από τη γεωμετρία όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1

$$d\dot{V}_D = A_C \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{\pi}{4} d_{jet}^2 \frac{dh}{dt} \quad (3.13)$$

Εξισώνοντας τις (3.12) και (3.13) αν λύσουμε ως προς dh και ολοκληρώσουμε προκύπτει:

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_{jet} \cdot \sigma_f \cdot v}{2 \cdot C_2 \cdot \dot{m}_A \cdot (v_P - v_{thr})^2} + \frac{C_f}{d_{jet}} \cdot \frac{v_P}{v_P - v_{thr}}} \quad (3.14)$$

Από τις σχέσεις (3.11) και (3.14) και την (3.2) το ολικό βάθος κοπής είναι:

$$h = d_F (N_c + N_d) \quad (3.15)$$

Στις εξισώσεις αυτές, η παράμετρος δύναμης σ_f (τάση ροής υλικού τεμαχίου) δίνεται από:

$$\sigma_f \cong \frac{E_M}{14} \quad \text{όπου } E_M = \text{module του Young για το υλικό του τεμαχίου}$$

και το κατώφλιο ταχύτητας του κόκκου έχει μια πιο σύνθετη τιμή η οποία εξαρτάται από το σχήμα του κόκκου πάγου.

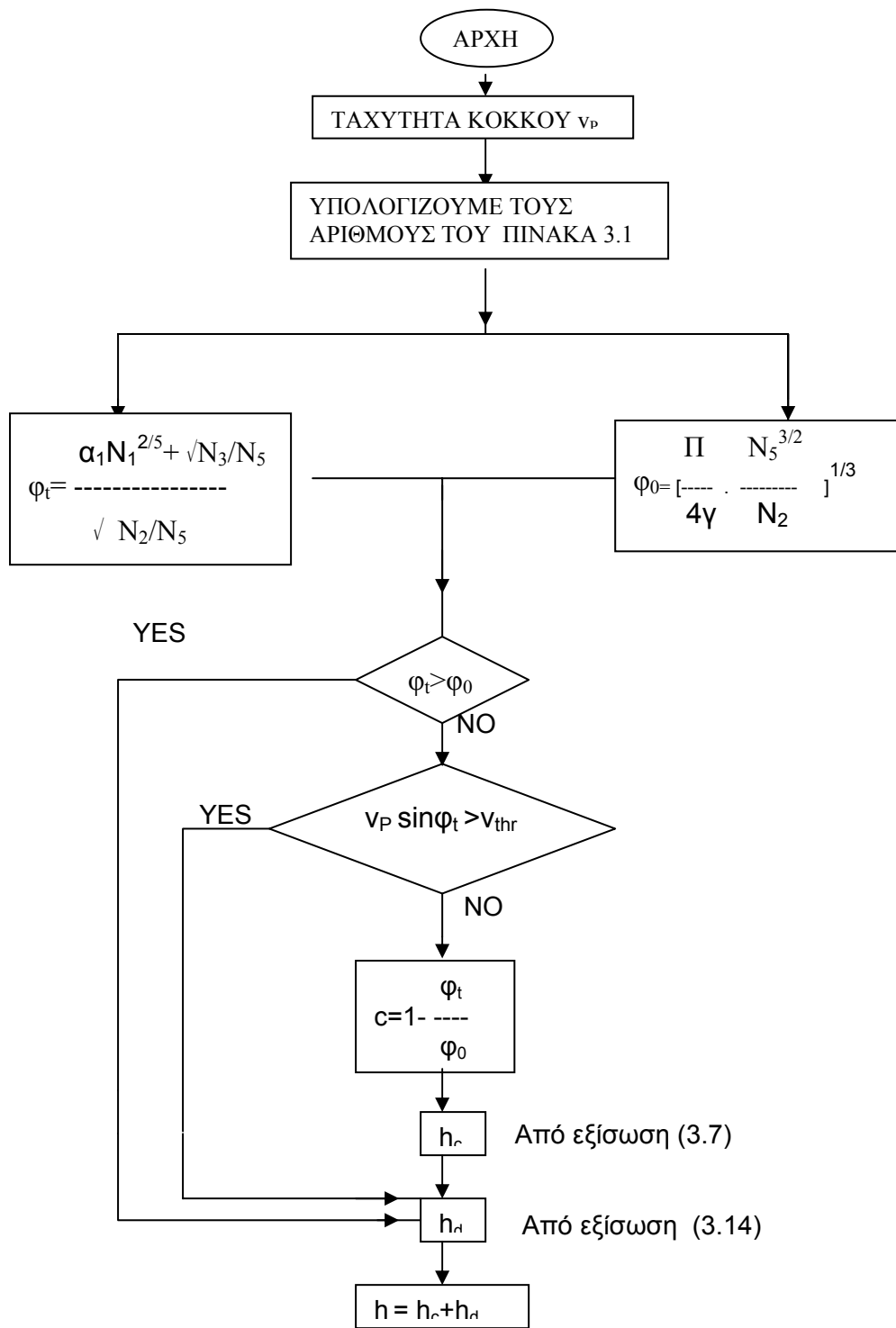
Ο πίνακας 3.1 έχει ένα σύνολο τιμών που υπολογίστηκαν πειραματικά. Οι τιμές σ_f και v_{thr} εξαρτώνται η μία απ' την άλλη. Υλικά με υψηλή τάση ροής έχουν υψηλά κατώφλια ταχυτήτων. Σε αντίθεση, υλικά με χαμηλή τάση ροής έχουν χαμηλά κατώφλια ταχυτήτων. Για το συντελεστή ζεύξης η τιμή $c_f = 0.002$ είναι επαρκής για βάθη μέχρι 50mm.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HASHISH

ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ	ΦΥΣΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ
$N_c = \frac{h_c}{d_{jet}}$	Αριθμός βάθους φθοράς από κοπή
$N_d = \frac{h_d}{d_{jet}}$	Αριθμός βάθους φθοράς από παραμόρφωση
$N_1 = \frac{\rho_P \cdot v \cdot d_{jet}^2}{\dot{m}_A}$	Αριθμός οριζόντιας μετακίνησης
$N_2 = \frac{\rho_P \cdot v_P^2}{\sigma_f}$	Αριθμός σχετικής δύναμης
$N_3 = \frac{\rho_P \cdot v_{thr}^2}{\sigma_f}$	Αριθμός ελάχιστης σχετικής δύναμης
$N_4 = C_f$	Συντελεστής ζεύξης των τοιχωμάτων
$N_5 = 3 \cdot R_f^{3/5}$	Αριθμός σχήματος τεμαχίου
$N_6 = \frac{V_{thr}}{V_P} = \frac{N_3}{N_2}$	Αριθμός κατωφλίων ταχύτητας

Ο παραπάνω πίνακας προέκυψε από πειραματική εφαρμογή που έκανε ο Hashish [12] για AWJM, και η συσχέτιση μοντέλου και πειράματος ήταν αρκετά καλή. Γ' αυτό και η μοντελοποίηση για IWJM αναμένεται το ίδιο επιτυχής.

Γενικά από την εφαρμογή αυτού του μοντέλου μπορούμε ν' αναφέρουμε ότι το μοντέλο λαμβάνει μικρές τιμές για βαθιά κοπή ($h > 30\text{mm}$) και πολύ υψηλές τιμές για μικρή κοπή ($h < 15\text{mm}$). Η ανάλυση αυτή αγνοεί την επίδραση της δέσμης ροής υψηλής ροής. Επίσης αυτό το μοντέλο περιορίζεται σε όλκιμα υλικά. Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι ότι λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα των κόκκων που υπάρχουν στη δέσμη νερού η οποία είναι δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια και υπολογίζεται με προσεγγιστικές μεθόδους.



Όπου $\alpha_1 = (\pi/14)^{2/5}$
 $d_{jet} = d_F$
 $c_f = 0.002$

Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ροής μιας απλής διαδικασίας υπολογισμού με βάση το μοντέλο

3.2.2 Μοντέλο απομάκρυνσης όγκου για ψαθυρά υλικά

Για τη μοντελοποίηση της κοπής σε ψαθυρά υλικά θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο των Zeng, Kim, Heines, Kim το οποίο συσχετίζει την μακροσκοπική αφαίρεση υλικού στο μέτωπο κοπής με την συσσωρευμένη επίδραση της μικροκοπής από μεμονωμένους κόκκους. Το μέτωπο κοπής $h(x)$ ακολουθεί την συνάρτηση παραβολής:

$$\frac{db_s}{dt} = \frac{dx}{dt} \cdot \cos \varphi \quad (3.16)$$

Στη σχέση αυτή ds : πλάτος κοπής, ενώ μπορούμε να θεωρήσουμε:

$$\frac{dx}{dt} = v, \text{ και}$$

$\frac{db_s}{dt}$ = είναι μια μονοδιάστατη μεταβλητή που εκφράζει το ρυθμό της γραμμικής απομάκρυνσης υλικού.

Εάν επίσης θέσουμε $d_{jet} = \cos \varphi \cdot d_F$ τότε η (3.16) γίνεται:

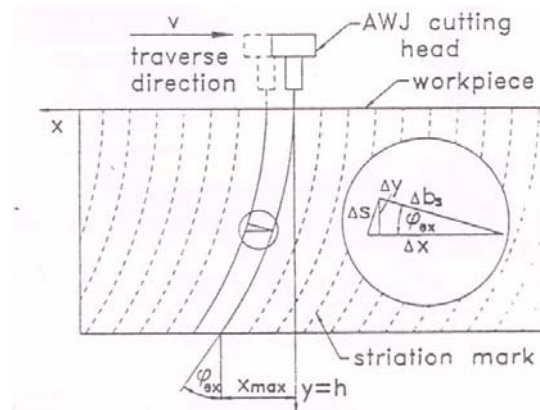
$$\dot{V}_M = \int \dot{M} \cdot d_F \cdot \cos \varphi \cdot ds \quad (3.17)$$

Το βάθος κοπής εκφράζεται από τη σχέση:

$$h = \frac{f(\phi_c) \cdot \left(\frac{\dot{M}_A}{\dot{M}_W} \right) \cdot V_M}{d_F \cdot v} \quad (3.18)$$

όπου: ϕ_c = γωνία εξόδου της δέσμης κοπής

V_M = όγκος απομακρυνόμενου υλικού



Σχήμα 3.3 Γεωμετρική αποτύπωση του μετώπου κοπής με IWJM

Στην εξίσωση (3.18) φ_c είναι η γωνία εξόδου της δέσμης κοπής αφού επιτεύχθηκε το μέγιστο βάθος κοπής. Η συνάρτηση $f(\varphi_c)$ δίδεται από τον πίνακα 3.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ $f(\varphi_c)$ ΓΙΑ ΓΩΝΙΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

φ_c [°]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f(\varphi_c)$	1	1	1	0.998	0.993	0.981	0.953	0.891	0.752	0.053

Αν υπολογίσουμε τον όγκο του απομακρυνόμενου υλικού V_M , οι αντικαταστάσεις οδηγούν στην παρακάτω εξίσωση:

$$h = \left[\frac{\eta_T \cdot \alpha \cdot \mu^3 \cdot f_{\text{comp}}}{1 + \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_W}} \right]^2 \cdot \frac{C_{\text{col}} \cdot \dot{m}_A \cdot P}{\rho_W \cdot d_F \cdot v} \cdot \left[\frac{2 \cdot f_W \cdot f(v_M) \cdot D_M \cdot \sigma_f \cdot \varphi^2}{3 \cdot \gamma_M \cdot E_M} + \frac{\varphi}{\sigma_f} \right] \quad (3.19)$$

όπου: C_{col} = παράγοντας πρόσκρουσης ($C_{\text{col}} = 0.104$)

$f(v_M)$ = συνάρτηση του λόγου Poisson του μετάλλου (βλ. σχήμα 3.4)

f_W = ποσό της ενέργειας από το κύμα έντασης που συνδέεται με τη θραύση υλικού ($f_W \simeq 6.65 \cdot 10^4$)

α = γωνία πρόσκρουσης

μ = παράμετρος μετάδοσης ροπής της δέσμης

f_{comp} = παράγοντας συμπίεσης

ρ = περίμετρος

ρ_W = πυκνότητα νερού

D_M = μέσο μέγεθος στοιχείου από το υλικό του τεμαχίου

φ = γωνία πρόσπτωσης κόκκων

γ_M = επιφανειακή ενέργεια υλικού του τεμαχίου

E_M = module Young για το υλικό του τεμαχίου

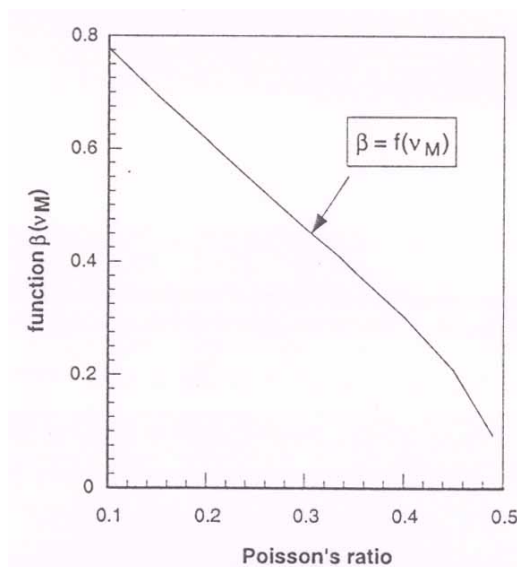
Αν συγκεντρώσουμε όλες τις ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου σε μια παράμετρο R_E και συγκεντρώσουμε όλες τις σταθερές στην $\Sigma_{\text{const}} = 2670$, παίρνουμε την παρακάτω σχέση:

$$h = \frac{\dot{m}_A \cdot \dot{m}_W^2 \cdot \rho}{2670 \cdot \left(\dot{m}_A + \dot{m}_W \right)^2 \cdot d_F \cdot v \cdot R_E} \quad (3.20)$$

Ο παράγοντας R_E λέγεται «αντίσταση διάβρωσης». Το αντίστροφο δηλ.

$$\frac{1}{R_E} = N_m \text{ ονομάζεται αριθμός κατεργασιμότητας κατά τους Zeng, Kim, Wallace [13]}$$

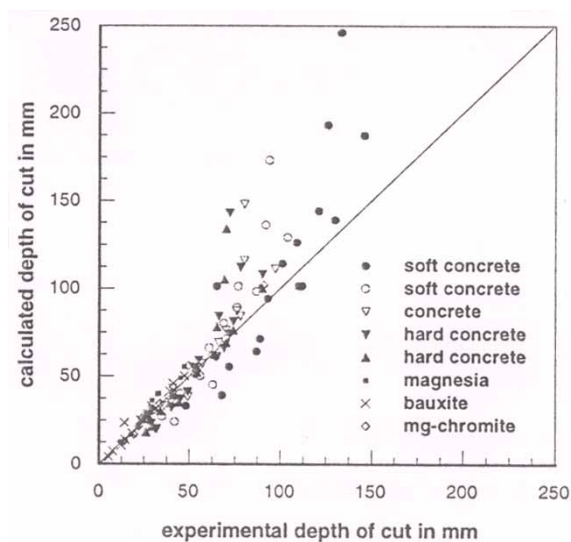
και παριστάνει τη συμπεριφορά των υλικών στην κοπή AWJ.



Σχήμα 3.4 Η συνάρτηση $f(v_M)$

Μια απλοποιημένη έκφραση της εξίσωσης (3.20) είναι η παρακάτω:

$$h = \frac{N_m \cdot p^{1.25} \cdot m_A^{0.343} \cdot m_W^{0.687}}{8800 \cdot v^{0.866} \cdot d_F^{0.618}} \quad (3.21)$$



Σχήμα 3.5 Επαλήθευση του μοντέλου

Στο σχήμα 3.5 μπορούμε να δούμε ένα συγκριτικό γράφημα μεταξύ υπολογισμών από το μοντέλο και πειραματικών δεδομένων. Το μοντέλο υπολογίζει τιμές υψηλότερες απ' τις πειραματικές. Ειδικά για μαλακά υλικά, όπως τα μίγματα μπετόν, η διαφορά μεταξύ πειράματος και μοντέλου φτάνει το 80%. Επίσης το μοντέλο δεν είναι αποτελεσματικό για κοπή μεγάλου βάθους. Παρόλα αυτά η ακρίβεια είναι επαρκής για κεραμικά υλικά.

3.2.3 Γενικό μοντέλο απομάκρυνσης όγκου

Οι Royu και Ramulu [14] περιγράφουν μια διαδικασία όμοια με το κεφ 3.2.1 για να υπολογίσουν το βάθος κοπής h_{SC} για τη ζώνη «απαλής κοπής» και το βάθος κοπής h_{RC} για τη ζώνη «σκληρής κοπής». Στο μοντέλο που προτείνουν για την γωνία πρόσπτωσης των κόκκων πάγου χρησιμοποιούνται τριγωνομετρικές εκφράσεις.

$$\sin \varphi = \frac{dx}{ds} \quad \text{και} \quad (3.22)$$

$$\cos \varphi = \frac{dy}{ds} = \sqrt{1 - \left(\frac{dx}{ds}\right)^2} \quad (3.23)$$

όπου s είναι το μήκος τόξου του μετώπου κοπής.

Από τη σχέση της ισορροπίας ροπών (3.8) για την ζώνη «απαλής κοπής» ισχύει:

$$\frac{dx}{ds} = K_3 \cdot [K_1 + K_2 \cdot S] \quad (3.24)$$

$$\text{όπου } K_1 = \frac{1}{v_{jet}}$$

$$K_2 = \frac{\pi \cdot d_{jet} \cdot \rho_{jet} \cdot C_{F1}}{4 \cdot (\dot{m}_A + \dot{m}_W)}$$

$$K_3 = \frac{v_c}{\left[\frac{2}{v \cdot d_{jet}} \cdot \frac{7}{\pi} \cdot \frac{\dot{m}_A}{\rho_P \cdot d_{jet}} \right]^{2/5}}$$

Λύνουμε τη διαφορική εξίσωση για $x = 0$ και $s = 0$. Απλοποιούμε το δεξί μέρος της (3.24) θέτοντας $K_3 \cdot [K_1 + K_2 \cdot S] = \Theta$ και $K_3 \cdot K_1 = \Theta_0$.

Αντικαθιστούμε το $\frac{dx}{ds}$ της σχέσης (3.23) στην (3.24) και θεωρούμε $y = 0$ για

$s = 0$. Αφού ολοκληρώσουμε έχουμε τη σχέση:

$$y = h_{sc} = \frac{1}{K_2 \cdot K_3} \cdot \left[\frac{\Theta \cdot \sqrt{1 - \Theta^2}}{2} - \frac{\Theta_0 \cdot \sqrt{1 - \Theta_0^2}}{2} + \frac{\arcsin \Theta}{2} - \frac{\arcsin \Theta_0}{2} \right] \quad (3.25)$$

Από τις εξισώσεις (3.24) και (3.25) υπολογίζεται το βάθος της ζώνης «απαλής κοπής».

Σύμφωνα με τους ίδιους μελετητές θα εκφράσουμε και το μοντέλο της ζώνης που ονομάζουν «σκληρή κοπή».

$$\frac{dx}{ds} = K_4 \cdot \frac{b}{v_{jet}^2} \quad (3.26)$$

$$\frac{dv_{jet}}{ds} = -b \cdot K_7 \cdot v_{jet}^2 \quad (3.27)$$

$$\frac{db}{ds} = K_7 \cdot K_6^2 \cdot \left[\frac{b}{v_{jet}} \right]^5 \cdot \left[\frac{5 \cdot v_{jet}^{10} - 9 \cdot K_4^2 \cdot b^2 \cdot v_{jet}^6}{2 \cdot K_4^2 \cdot K_6^2 \cdot b^5 - 3 \cdot v_{jet}^9} \right] \quad (3.28)$$

όπου

b = πλάτος κοπής

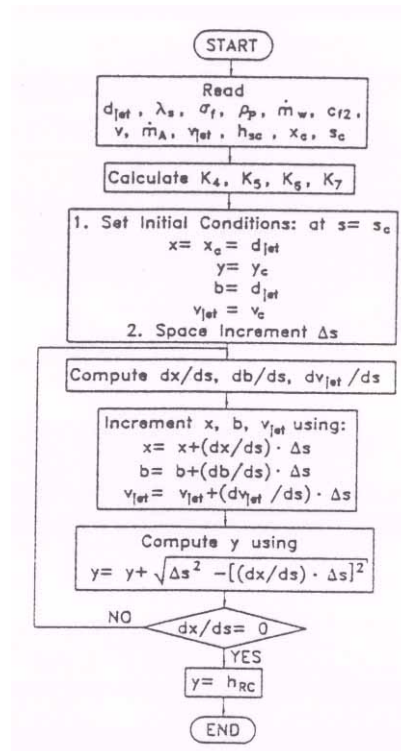
$$K_4 = \frac{4 \cdot \lambda_s \cdot v \cdot \sigma_f}{\dot{m}_A}$$

$$K_6 = \frac{7}{\pi} \cdot \left[\frac{\dot{m}_A}{\rho_p \cdot v \cdot \lambda_s} \right] \cdot \left[\frac{1}{v_c} \right]^{2.5} \cdot K_2^{2.5}$$

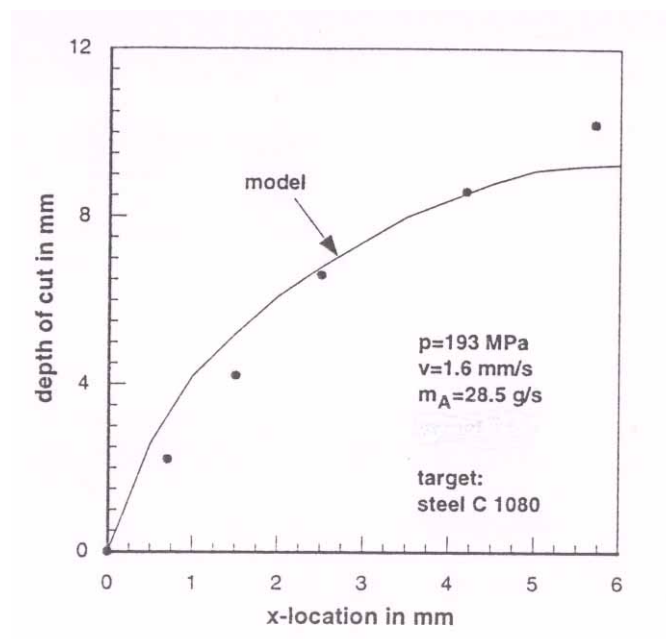
$$K_7 = \frac{\pi \rho_{jet} C_{f2}}{2 \cdot (\dot{m}_A + \dot{m}_W)}$$

Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν τρεις εξαρτημένες μεταβλητές x , b , v_{jet} και τρεις εμπειρικές σταθερές λ_s , σ_f , $C_{f1,2}$. Για να επιλυθεί αυτή η ομάδα εξισώσεων και να

υπολογιστεί το βάθος κοπής της «σκληρής ζώνης», h_{RC} , οι παραπάνω μελετητές προτείνουν μια διαδικασία που φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής της αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων (3.26-3.28)



Σχήμα 3.7 Υπολογισμοί στο μέτωπο κοπής

Στο σχήμα 3.7 φαίνεται το μέτωπο κοπής καθώς αυτό υπολογίζεται απ' το μοντέλο προσομοίωσης. Αυτή η καμπύλη συμφωνεί με τη γεωμετρία του πραγματικού μέτρωσης. Στο σημείο μετάβασης ($h = h_{SC}$) παρατηρείται μια ασυνέχεια στη συνάρτηση. Επίσης, η πορεία της συνάρτησης τείνει στο μηδέν καθώς το τελικό βάθος κοπής επιτυγχάνεται $h = h_{SC} + h_{RC}$. Η σύγκριση ανάμεσα στο μοντέλο και τα πειραματικά αποτελέσματα δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για τη ζώνη «απαλής κοπής». Ωστόσο οι πειραματικές τιμές για το συνολικό βάθος κοπής διαφοροποιούνται από το μοντέλο, μερικές φορές πάνω από 200%. Όμως η σπουδαιότητα του μοντέλου βρίσκεται στο ότι ισχύει όχι μόνο για όλκιμα, μα και για ψαθυρά υλικά.

3.3 Μοντέλα Διατήρησης Ενέργειας

3.3.1 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας δυο παραμέτρων

Η βάση για τα μοντέλα διατήρησης ενέργειας είναι είτε η αναλογία μεταξύ της ενέργειας της δέσμης ice-water και ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού.

$$\frac{dV_M}{dt} \propto \frac{dE_A}{dt} \quad (3.27)$$

είτε η διατήρηση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσης υλικού. Στην εξίσωση (3.27) η παράμετρος αναλογίας που παρουσιάζεται εκφράζει την ενέργεια αφαίρεσης υλικού. Επίσης γεωμετρικά, η απομάκρυνση υλικού, dV_M εκφράζεται από τη σχέση:

$$dV_M = h \cdot b \cdot dx \quad (3.28)$$

Υποθέτουμε ότι όλοι οι κόκκοι έχουν ιδανική ταχύτητα χωρίς περιστασιακές αυξομειώσεις. Επίσης $\frac{dx}{dt} = V$. Κατ' αυτό τον τρόπο.

$$h \cdot b \cdot v \propto \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_A \cdot v_p^2 \quad (3.29)$$

Ας θεωρήσουμε την σχέση μεταξύ ταχύτητας κόκκου και πίεσης αντλίας, αν υποθέσουμε τον ρυθμό ροής μάζας κόκκων πάγου και το πλάτος κοπής, σταθερές. Αν εισάγουμε ένα παράγοντα αναλογίας C_0 προκύπτει η σχέση:

$$h = C_o \frac{\rho}{v} \quad (3.30)$$

Οι πειραματικές εφαρμογές έδειξαν ότι το κρίσιμο κατώφλιο πίεσης P_{thr} , πρέπει να ξεπεραστεί για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία αφαίρεσης όγκου.

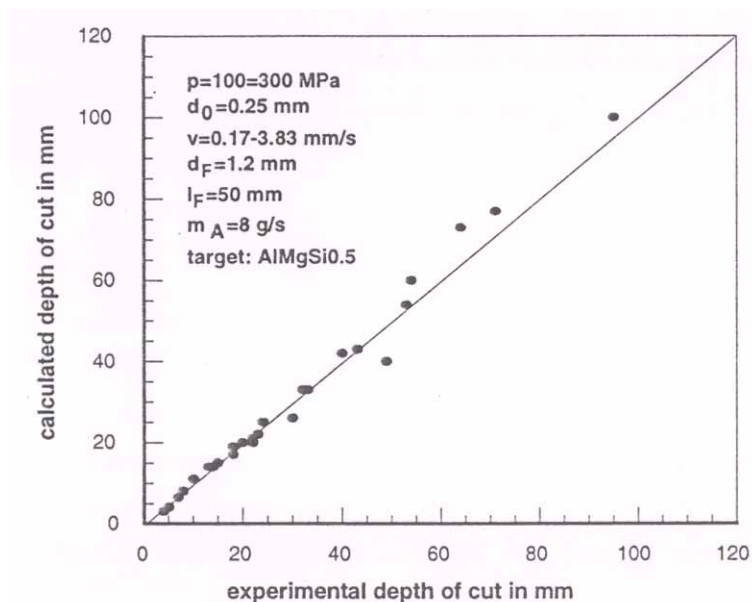
Σύμφωνα με τον Blickwedel [10] το βάθος κοπής και ο ρυθμός οριζόντιας μετακίνησης δεν είναι αντιστρόφως ανάλογα ποσά. Γι' αυτό προσθέτει έναν δείκτη $f(v)$ που εκφράζει την απώλεια ενέργειας της δέσμης κατά την κοπή. Αυτή η απώλεια αυξάνεται με την αύξηση του βάθους της κοπής. Αυτές οι τροποποιήσεις, μαζί με ανάλυση παλινδρόμησης για $f(v)$ δίνουν:

$$h = C_o \frac{P - P_{thr}}{V^{0.86 + \frac{2.09}{V}}} \quad (3.31)$$

όπου: P = πίεση αντλίας

P_{thr} = κατώφλιο πίεσης υλικού.

Στον παρακάτω πίνακα 3.3 υπάρχουν τυπικές τιμές C_o και P_{thr} για μερικά υλικά, ενώ στο σχήμα 3.8 δίνεται η σύγκριση ανάμεσα στους υπολογισμούς της σχέσης 3.31 και τις πειραματικές τιμές.



Σχήμα 3.8 Επαλήθευση του μοντέλου του Blickwedel

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ BLICKWEDEL

Υλικό	Παράμετροι	
	C_o	P_{thr} [Μρα]
Κράμα Αλουμινίου	0.99	55.6
Χάλυβας Ωστενίτης	0.42	55.0
Γυαλί	2.34	16.0
Τιτάνιο	0.53	52.5

3.3.2 Μοντέλο παλινδρόμησης διατήρησης ενέργειας

Εδώ χρησιμοποιούμε το μοντέλο Oweinach [15] ο οποίος χρησιμοποιεί την εξίσωση (3.29) σε μια τροποποιημένη μορφή.

$$d\dot{V}_M \cdot \varepsilon_M = \frac{dE_A}{dt} \quad (3.32)$$

όπου ε_M = ειδική ενέργεια διάβρωσης.

Μετά από αντικατάσταση $\dot{V}_M = h \cdot v \cdot b$ και μετά από πράξεις

$$h = n_h = \frac{\dot{m}_A \cdot v_p^2}{2 \cdot v \cdot b \cdot \varepsilon_M} \quad (3.33)$$

Στη σχέση αυτή η παράμετρος n_h εξαρτάται από τη διαδικασία και τις ιδιότητες των υλικών

$$n_h = f_1(\dot{m}_A) \cdot f_2(A) \cdot f_3(\varphi) \cdot f_4(M) \quad (3.34)$$

όπου: A: αριθμός πρόσκρουσης

M: μάζα κόκκου

Για την επίλυση της (3.34) ο Oweinach αναπτύσσει μοντέλα παλινδρόμησης. Η παράμετρος ε_M υπολογίζεται από πειραματικές κοπές. Στον πίνακα 3.4 αναφέρονται οι αναλύσεις παλινδρόμησης του μοντέλου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Συνάρτηση	Παλινδρόμηση
$f_1(\dot{m}_A)$	$4.833 - 0.04733 \cdot \dot{m}_A + 1.658 \left(\frac{1}{\dot{m}_A} - 2 \right)$
$f_2(A)$	$0.79 \cdot \frac{h_{HV} \cdot h_{(KG)}}{h_{(HV100)} \cdot h_{(130[\mu m])}}$
$f_3(\varphi)$	$51.86 \cdot \varphi^3 - 174.6 \cdot \varphi^2 + 162.6\varphi - 0.55$
$f_4(M)$	$HB - \beta \cdot \frac{HB - MT}{3.5343}$

3.3.3 Μοντέλο διατήρησης ενέργειας ημι-εμπειρικό

Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από τους Capello και Croppetti [16] και έχει την τελική μορφή:

$$h = \left[1 + \gamma_2 \cdot (1 + \gamma_1) \cdot \frac{\dot{m}_A \cdot v_p^2}{v \cdot d_F} \right]^{\frac{1}{1+\gamma_1}} - 1 \quad (3.35)$$

όπου γ_1 = παράμετρος απώλειας ενέργειας.

Η παράμετρος γ_2 σχετίζεται με τον παράγοντα αναλογίας n_h στη σχέση:

$$dV_M = n_h \cdot dE_A$$

όπου ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται είναι ανάλογος της κινητικής ενέργειας της δέσμης νερού με κόκκους πάγου και ο συντελεστής n_h που δίνει την αναλογία σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της απομάκρυνσης υλικού, με τα χαρακτηριστικά του κόκκου πάγου όπως επίσης και με τα χαρακτηριστικά του υλικού.

Όμοια λοιπόν και η παράμετρος γ_2 εξαρτάται από το υλικό καθώς και από τα χαρακτηριστικά των κόκκων πάγου και είναι πολύ ευαίσθητη στο βάθος κοπής. Η παράμετρος γ_1 αναπαριστά τις απώλειες ενέργειας και την συνολική αποτελεσματικότητα της κοπής. Αφού αυτή η παράμετρος εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου, θεωρείται παράμετρος «κατεργασιμότητας». Και οι δύο παράμετροι γ_1 και γ_2 υπολογίζονται από μη γραμμική ανάλυση. Παρακάτω ο πίνακας 3.5 δείχνει τις εμπειρικές σταθερές για διάφορα υλικά. Όπως φαίνεται απ' τον πίνακα αυτό η παράμετρος διάχυσης της ενέργειας γ_1 είναι λιγότερο ευαίσθητη στα κατεργαζόμενα υλικά.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
CAPELLO ΚΑΙ CROPPETTI (1993)**

Υλικό	Παράμετροι	
	γ_1	γ_2
Αλουμίνιο		$8.752 \cdot 10^{-11}$
Πλαστικά με ενισχυμένες ίνες	22.8	$2.595 \cdot 10^{-10}$
Γυαλί		$3.115 \cdot 10^{-10}$

3.3.4 Μοντέλα διατήρησης ενέργειας για υλικά *pre-cracked*

Για υλικά με πολλαπλές ρωγμές χρησιμοποιούμε το μοντέλο Momber και Konacenic [17]. Αυτοί μελετούν το ισοζύγιο μεταξύ της ενέργειας απομάκρυνσης υλικών και της δυναμικής ενέργειας που αποβάλλεται κατά τη διάρκεια ενός τεστ συμπίεσης.

$$E_{Abs}D = X_M \frac{P_H}{\dot{V}_M} \quad (3.36)$$

όπου X_M = παράμετρος δυνατότητας απομάκρυνσης υλικού.

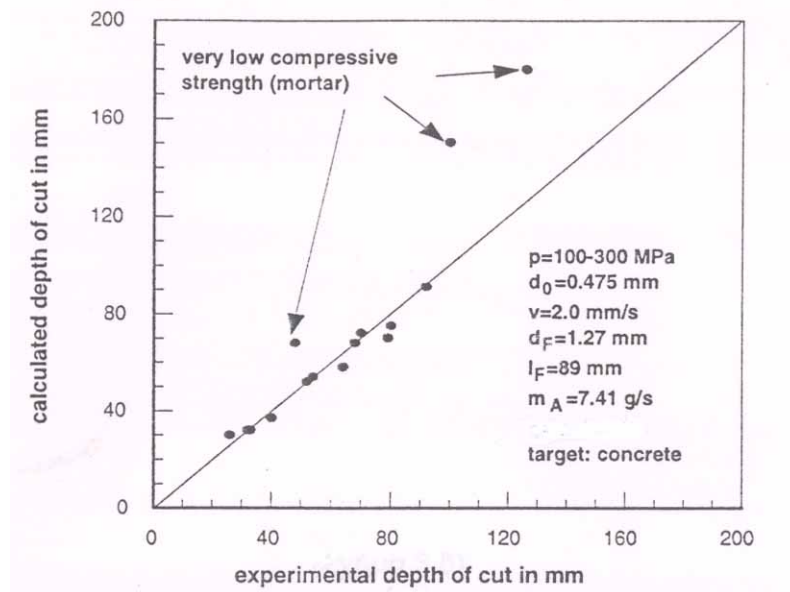
Αν στην προηγούμενη σχέση αντικαταστήσουμε $\dot{V}_M = h \cdot b \cdot v$ τότε καταλήγουμε ότι:

$$h = \frac{c_1 \cdot (c_2 \cdot E_{ABS}D) \cdot P \cdot Q_W}{E_{ABS}D \cdot b \cdot v} \quad (3.37)$$

Στη σχέση αυτή η συνάρτηση στην παρένθεση είναι μια εξίσωση παλινδρόμησης για τη σχέση ανάμεσα στη δυνατότητα απομάκρυνσης υλικού και την ενέργεια που απορροφάται από τη δομή του υλικού. Η παράμετρος c_2 είναι ευαίσθητη στην οριζόντια μετακίνηση και την πίεση της αντλίας.

Στο σχήμα 3.9 υπάρχει ένα διάγραμμα που συσχετίζει τα αποτελέσματα της σχέσης (3.37) και των μετρήσεων. Το μοντέλο ισχύει για σκυρόδεμα αλλά παίρνει πολύ χαμηλές τιμές για κονιάματα χαμηλής αντοχής.

Ο λόγος είναι ότι στα κονιάματα η δέσμη δεν παράγει ευθείες εγκοπές όπως υποθέτει το μοντέλο.



Σχήμα 3.9 Επαλήθευση του μοντέλου Momber-Kovacevic

Μια ομάδα ερευνητών με τον Iihoshi [18] ανέπτυξαν ένα μοντέλο για κοπή πετρωμάτων με AWJ που μπορεί να τροποποιηθεί για IWJ. Η βασική ιδέα του μοντέλου είναι η άμεση σχέση μεταξύ της δύναμης της δέσμης, P_w , και του βάθους κοπής. Έτσι τελικά:

$$h = \left[c_{01} + c_{02} \cdot \left(\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_W} \right)^{c_2} \right] \cdot \frac{P_w}{v \cdot x} \quad (3.38)$$

Οι παράμετροι c_{01} , c_{02} υπολογίζονται από πολλαπλή παλινδρόμηση. Συγκεκριμένα, η παράμετρος c_{02} είναι ευαίσθητη στο επιλεγμένο λειαντικό μέσο (στην περίπτωση μας σύσταση του πάγου).

3.4 Μοντέλα παλινδρόμησης

3.4.1 Πολυπαραγοντικά μοντέλα παλινδρόμησης

Στην ομάδα αυτή μοντέλων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο Chung, Geskin, Singh [19] που μελετούν την συσχέτιση ανάμεσα στις διαχειριστικές παραμέτρους του AWJ για κοπή όλκιμων υλικών και της γεωμετρίας κοπής. Αυτό μπορεί να επεκταθεί σε IWJ κατεργασία κοπής. Οι μελετητές έκαναν μια σειρά πειραμάτων και χρησιμοποίησαν τ' αποτελέσματα των πειραμάτων για να φτιάξουν εξισώσεις παλινδρόμησης. Το τελικό μοντέλο είναι:

$$h = c_{O1} \cdot \frac{\dot{m}_A^{c_3} \cdot (P - P_{thr})}{v \cdot b} + c_{O2} \quad (3.39)$$

όπου p = πίεση αντλίας

p_{thr} = κατώφλιο πίεσης υλικού.

Στον παρακάτω πίνακα 3.6 υπάρχει μια λίστα με τις τιμές των παραμέτρων όπως επίσης και τιμές από τις σταθερές της παλινδρόμησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ CHUNG [19]

Υλικό	d_p [μm]	d_o [mm]	c_{01}	c_3	c_{02}	P_{thr} [MPa]	
Χάλυβας	300	0.254	0.0365	0.6	-0.638	70	
		0.305	0.0397		-0.085		
		0.178	0.0383		-2.415		
		0.229	0.0431		-1.536		
	177	0.254	0.0447		-0.207		
		0.305	0.0513		-1.605		
		0.356	0.0490		1.204		
	125	0.254	0.0501		0.049		
		65	0.254		0.0285		1.547
			0.356		0.0401		0.468
Τιτάνιο	177	0.178	0.0416	0.7	-0.827	60	
		0.254	0.0217		-0.334		
Αλουμίνιο	300	0.203	0.0542	0.65	-0.374	63	
		0.254	0.0728		-0.616		
		0.305	0.0855		-0.337		
	177	0.203	0.0602		-0.716		
		0.254	0.0898		-0.520		
		0.305	0.1093		-0.81		
65	0.254	0.0882	-0.987				
	0.305	0.0934	-0.987				

Οι μελετητές Konacevic, Mohan, Hirscher υιοθετούν κι αυτοί μια κλασματική προσέγγιση στο πειραματικό σχεδιασμό για να μοντελοποιήσουν το βάθος κοπής. Συγκεκριμένα προτείνουν την παρακάτω σχέση:

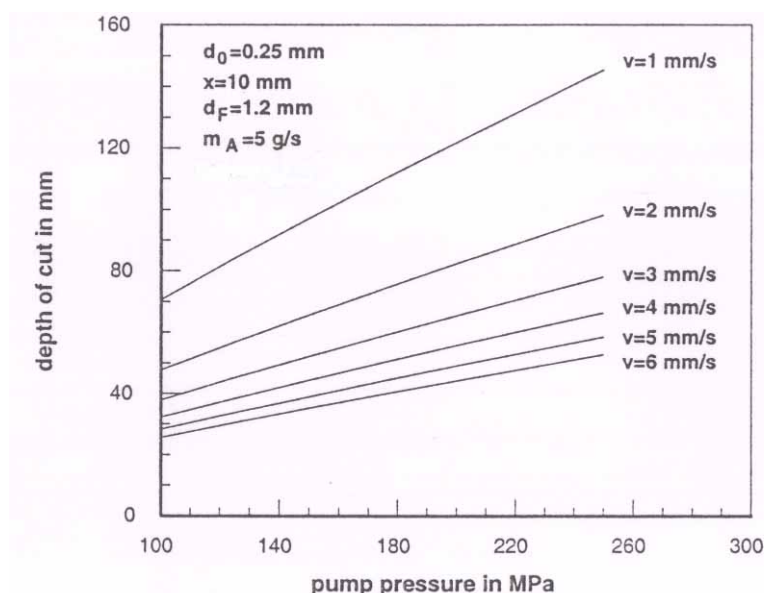
$$h = c_o \cdot p^{c_1} \cdot \dot{m}_A^{c_2} \cdot v^{c_3} \cdot d_F^{c_4} \cdot x^{c_6} \quad (3.40)$$

Τα δεδομένα πειραματικών εφαρμογών κοπής που βασίζονται σε 2^η παραγοντικό σχεδιασμό συμφωνούν με την παραπάνω εξίσωση. Στον πίνακα 3.7

υπάρχουν οι τελικές σταθερές παλινδρόμησης ενώ στο σχήμα 3.10 μπορούμε να δούμε εφαρμογή του μοντέλου για τον υπολογισμό του βάθους κοπής σε μπετόν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7 ΕΥΡΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ (3.40)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΕΥΡΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ		c_i	ΣΤΑΘΕΡΑ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ	
	Μπετόν	Μαλακός χάλυβας		Μπετόν	Μαλακός χάλυβας
P [Μρα]	103-241	170-275	c_0	1.3545	0.0014
m_A [g/s]	4.54-9.07	3.02-18.87	c_1	0.7903	1.47
v [mm/s]	0.85-6.77	0.42-0.92	c_2	0.1844	0.211
d_F [mm]		1.2-2.6	c_3	-0.5671	-0.74
x [mm]		3.1-12.7	c_4	-	0.756
	6.35-24.5		c_6	-0.0068	-0.139



Σχήμα 3.10 Υπολογισμός του βάθους κοπής σε μπετόν με τη βοήθεια μοντέλου πολλαπλών παλινδρομήσεων

3.4.2 Άλλα μοντέλα παλινδρόμησης

Οι Matsui, Matsumura, Ikemoto [20] ανέπτυξαν μοντέλα παλινδρόμησης για AWJ κατεργασία κοπής, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν και σε IWJ. Αυτοί προσπάθησαν να περιγράψουν τη σχέση μεταξύ της διαδικασίας κοπής και των ιδιοτήτων διαφόρων υλικών. Βασίστηκαν στις SEM-παρατηρήσεις και πρότειναν διαφορετικούς μηχανισμούς απομάκρυνσης υλικού για όλκιμα και ψαθυρά υλικά. Γι' αυτό οι μελετητές χρησιμοποιούν το μοντούλ της δομής της ύλης τους για να

εκτιμήσουν τα ψαθυρά υλικά και τη συμπεριφορά τους. αντίθετα, τα όλκιμα υλικά χαρακτηρίζονται από την σκληρότητα και την επιμήκυνση καθώς και από την πλαστική παραμόρφωση των τεμαχίων.

Εξαιτίας της ανάλυσης παλινδρόμησης των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι ερευνητές βρήκαν για όλκιμα υλικά τα παρακάτω:

$$A_h = 10^{4.74} \cdot [H_M \cdot \varepsilon]^{-0.65}, \text{ και} \quad (3.41 \text{ a})$$

$$A_h = 10^{4.98} \cdot \left[\frac{(\sigma_u + \sigma_y) \cdot \varepsilon}{2} \right]^{-0.64} \quad (3.41 \text{ b})$$

όπου H_M = σκληρότητα υλικού τεμαχίου

ε = τάση, ένταση

και για ψαθυρά υλικά,

$$A_h = 10^{0.91} \cdot \left[\frac{\sigma_t^2}{2 \cdot E_M} \right]^{-1.97} \quad (3.42)$$

όπου σ_t = δύναμη εφελκυσμού του υλικού του τεμαχίου

E_M = μοντούλ του Young για το υλικό του τεμαχίου.

Η παραπάνω σχέση δεν ισχύει για πετρώματα όπως ο γρανίτης και το μάρμαρο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι προϋπάρχουσες ρωγμές επηρεάζουν η συμπεριφορά αυτών των υλικών στην κοπή.

3.5 Κινητικό μοντέλο

Το αντίστοιχο κινητικό μοντέλο αναπτύσσεται από τον Momber [21]. Το μοντέλο βασίζεται στη σχέση:

$$\frac{dCo_1}{dt} = K_R \cdot Co_2^m \quad (3.43)$$

Στη σχέση αυτή, Co_1 είναι η συγκέντρωση προϊόντος ανά μονάδα επιφάνειας, Co_2 είναι η συγκέντρωση αντιδρόντος ανά μονάδα επιφάνειας, K_R είναι η ταχύτητα αντίδρασης και m είναι η τάξη της αντίδρασης. Η γενική πορεία της απομάκρυνσης υλικού κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης τη δέσμης είναι η παραγωγή ενός αριθμού

στοιχείων που απομακρύνονται από το υλικό του τεμαχίου σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Έτσι,

$$\frac{dCo_1}{dt} = \frac{dN_M}{dt} \propto h \quad (3.44)$$

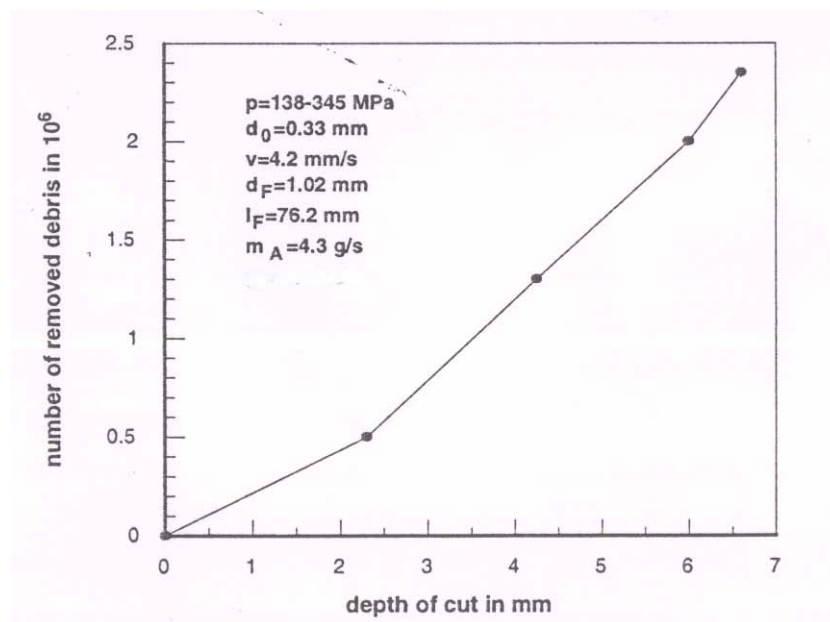
Το βάθος κοπής αυξάνεται όπως αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων του υλικού που απομακρύνονται (βλ. σχήμα 3.11). Κατά τη διάρκεια της κοπής, το υλικό δέχεται την πρόσκρουση από ένα αριθμό κόκκων πάγου που υπάρχουν μέσα στη δέσμη νερού.

$$Co_2 \propto \dot{m}_A \quad (3.45)$$

Από τις εξισώσεις (3.43) και (3.45) παίρνουμε:

$$h = K_A \cdot \dot{m}_A^m \quad (3.46)$$

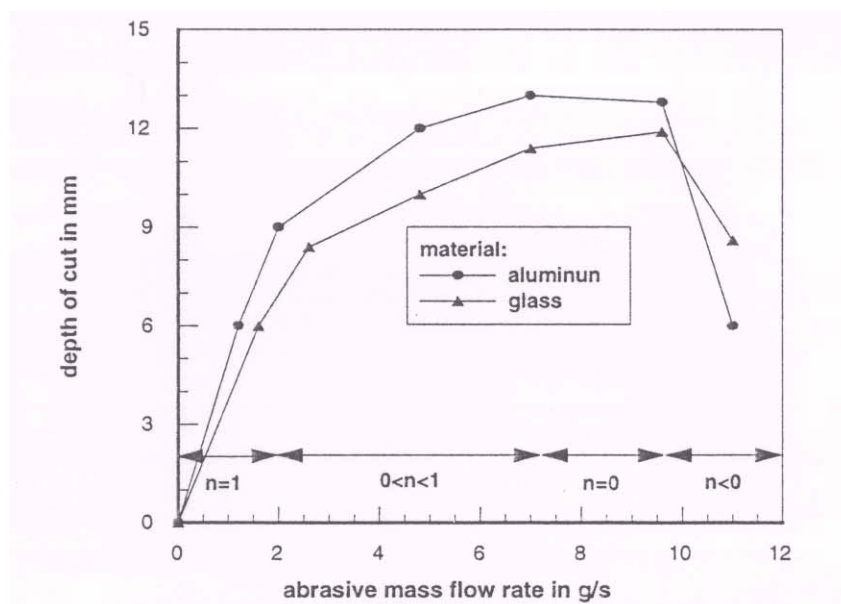
Στη σχέση αυτή K_A είναι η ταχύτητα αντίδρασης για IWJ κοπή και m είναι η τάξη της αντίδρασης. Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται τα μοντέλα για τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.46).



Σχήμα 3.11 Σχέση ανάμεσα στο βάθος κοπής και στον αριθμό των στοιχείων του υλικού που απομακρύνονται

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8 ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΟΠΗΣ

Μοντέλα	Εκθέτες δύναμης		
	ρ	m_A	v
Matsui κ.α	-	0	1
Kovacevic κ.α.	0.79	0.1844	0.51
Kovacevic	1.47	0.211	0.74
Zeng & Kim	1.25	0.343	0.86
Hashish «κοπή»	0.5	0.4	1
Chung κ.α.	1	0.6	1
Ihoshi κ.α.	1.5	0.762	1
Blickwedel	1	1	$f(v)$
Oweinah	1	1	1
Hashish «παραμόρφωση»	1	1	1
Tikhomirov κ.α.	1.5	1	-



Σχήμα 3.12 Σχέση ανάμεσα στο βάθος κοπής και στο ρυθμό ροής των κόκκων πάγου, με διαφορετικές τάξεις αντίδρασης.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι:

$$m = f(\dot{m}_A) \quad (3.47)$$

Ο Momber διακρίνει τις ακόλουθες περιπτώσεις:

α) $m = 1$ τότε από την (3.46)

$$h = K_A \cdot \dot{m}_A, \quad \frac{dh}{d\dot{m}_A} = K_A = \text{σταθερά} \quad (3.48 \text{ a})$$

β) $0 < m < 1$

$$h = K_A \cdot \dot{m}_A^M, \quad \frac{dh}{d\dot{m}_A} > 0 = f(\dot{m}_A) \quad (3.48 \text{ b})$$

γ) $m = 0$

$$h = K_A, \quad \frac{dh}{d\dot{m}_A} = 0 \quad (3.48 \text{ c})$$

δ) $M < 0$

$$h = K_A \cdot \dot{m}_A^m, \quad \frac{dh}{d\dot{m}_A} < 0 = f(\dot{m}_A) \quad (3.48 \text{ d})$$

Σύμφωνα με την θεωρία των χημικών αντιδράσεων μπορεί κάποιος να ορίσει μια πιθανότητα, P_E , κατά την οποία η αντίδραση -που στην περίπτωση μας είναι η διαδικασία κοπής- ν' αρχίσει να πραγματοποιείται. Δηλ.

$$K_A = A \cdot P_E \quad (3.49)$$

όπου A: αριθμός συγκρούσεων

Η πιθανότητα της αντίδρασης είναι:

$$P_E = f(E_{Act}, E_p) \quad (3.50)$$

Στη σχέση αυτή, E_{Act} είναι ένα φράγμα ενέργειας το οποίο πρέπει να υπερκαλυφθεί από την πρόσπτωση των κόκκων πάγου. Η ενέργεια αυτών των σωματιδίων είναι η κινητική τους ενέργεια. Όσο μεγαλύτερη είναι η κινητική ενέργεια, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Η ταχύτητα παραγωγής της αντίδρασης εξαρτάται από την τιμή A στην εξίσωση (3.49).

Η κινητική ενέργεια (E_p) των κόκκων πάγου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p = \alpha_T \cdot \frac{E_W}{N_p} \quad (3.51)$$

όπου $\alpha_T =$ σταθερά μεταφοράς ενέργειας και η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ $\alpha_T = 0.075$ και $\alpha_T = 0.09$

$E_W =$ κινητική ενέργεια της δέσμης νερού

$N_p =$ αριθμός κόκκων πάγου.

Η τιμή της κινητικής ενέργειας των κόκκων έχει τα παρακάτω όρια.

$$E_p^{\min} \leq E_p \leq E_p^{\max} \quad (3.52)$$

Η κατανομή της κινητικής ενέργειας των κόκκων πάγου όπως και των λειαντικών κόκκων στην κατεργασία AWJ ακολουθούν την κατανομή Gauss [όπως έχει βρεθεί πειραματικά από τους Chen, Geskin, Neusen, Momber]. Έτσι, η κατανομή της ενέργειας ενός κόκκου πάγου μπορεί να θεωρηθεί:

$$g(E_p) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{E_p}} \cdot e^{-\frac{(E_p - \bar{E}_p)^2}{2 \cdot \sigma_{E_p}^2}} \quad (3.53)$$

Ο Momber ορίζει μια κρίσιμη τιμή ενέργειας του υλικού για το φράγμα ενέργειας που αναφέρεται στη σχέση (3.50). Η τιμή αυτή είναι η ενέργεια που απαιτείται για να μετακινήσει ένα ελάχιστο αλλά συγκεκριμένο αριθμό από συντρίμια υλικού του τεμαχίου. Η ενέργεια αυτή είναι:

$$E_{Act} = f(\gamma_M) \quad (3.54)$$

όπου γ_M : είναι η επιφανειακή ενέργεια του υλικού του τεμαχίου.

Στο σχήμα 3.13 μπορούμε να δούμε γραφικά την πιθανότητα αντίδρασης ή την πιθανότητα η ενέργεια E_{Act} να ξεπεραστεί απ' την ενέργεια ενός κόκκου στην περιοχή που περικλείεται από τις $g(E_p)$ και E_{Act} .

$$P_E = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{E_p}} \cdot \int_{E_{act}}^{E_p} e^{-\frac{(E_p - \bar{E}_p)^2}{2 \cdot \sigma_{E_p}^2}} dE_p \quad (3.55)$$

Εάν, $P_E = P_{E_{max}}$, τότε έχει επιτευχθεί το μέγιστο πιθανό βάθος κοπής

Εάν, $P_E = P_{E_{min}}$, τότε έχουμε το ελάχιστον βάθος κοπής.

Σύμφωνα με τον Momber διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

(α) $E_{pmin} > E_{act}$

Σε μια τέτοια περίπτωση κάθε κόκκος πάγου που προσκρούει στο τεμάχιο συνεισφέρει στη διαδικασία αποδόμησής του. Έτσι, το αποτέλεσμα $P_E = 0$ δεν ισχύει κάτω απ' αυτές τις συνθήκες.

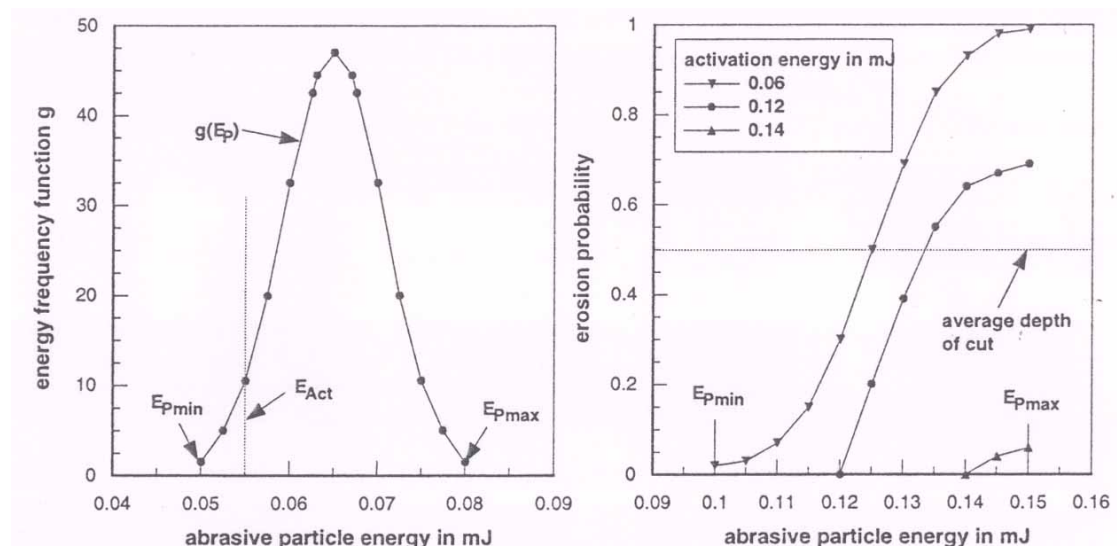
(β) $E_{pmin} > E_{act} > E_{pmax}$

Σ' αυτή την περίπτωση, $P_E = 0$ για ορισμένες τιμές της E_p .

γ) $E_{pmax} < E_{act}$

Σ' αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει κοπή και $PE = 0$.

Αναλυτικά, φαίνονται τα παραπάνω από πειραματικά αποτελέσματα στο σχήμα.



Σχήμα 3.13 Σχέσεις ανάμεσα στην κατανομή της κινητικής ενέργειας των κόκκων, την ενέργεια δραστηριοποίησης του υλικού και την πιθανότητα διάβρωσης.

3.6 Αριθμητικά μοντέλα

3.6.1 Αριθμητικές προσομοιώσεις

Από τα μοντέλα που υπάρχουν στη σύγχρονη βιβλιογραφία επιλέγουμε το μοντέλο του Corcoran γιατί μπορεί να επεκταθεί επιτυχώς από την κατεργασία AWJ στην IWJ.

Συγκεκριμένα, οι Corcoran, Mazurkiewicz, Karlic [22] ανέπτυξαν ένα μοντέλο με βάση το χρόνο, με τρεις διαστάσεις για να μοντελοποιήσει το μηχανισμό κοπής. Η ταχύτητα της δέσμης του νερού υποθέτουμε ότι ακολουθεί πολυωνυμική μορφή 6^{ου} βαθμού ως προς τη διάμετρο της δέσμης. Η μάζα των κόκκων πάγου στη μονάδα του χρόνου θεωρούμε ότι είναι σταθερή. Ο αλγόριθμος επιτρέπει ποικιλομορφία των κόκκων εξαιτίας της ανάμιξης. Το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα να υπάρχουν επιλογές για την κατανομή της θέσης των κόκκων πάγου μέσα στο ρεύμα νερού όπως είναι η ομοιόμορφη, η δακτυλοειδής και η τυχαία κατανομή. Το υλικό του τεμαχίου τοποθετείται στο τρισσορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα το οποίο συνδέεται με το κυλινδρικό σύστημα των κόκκων πάγου.

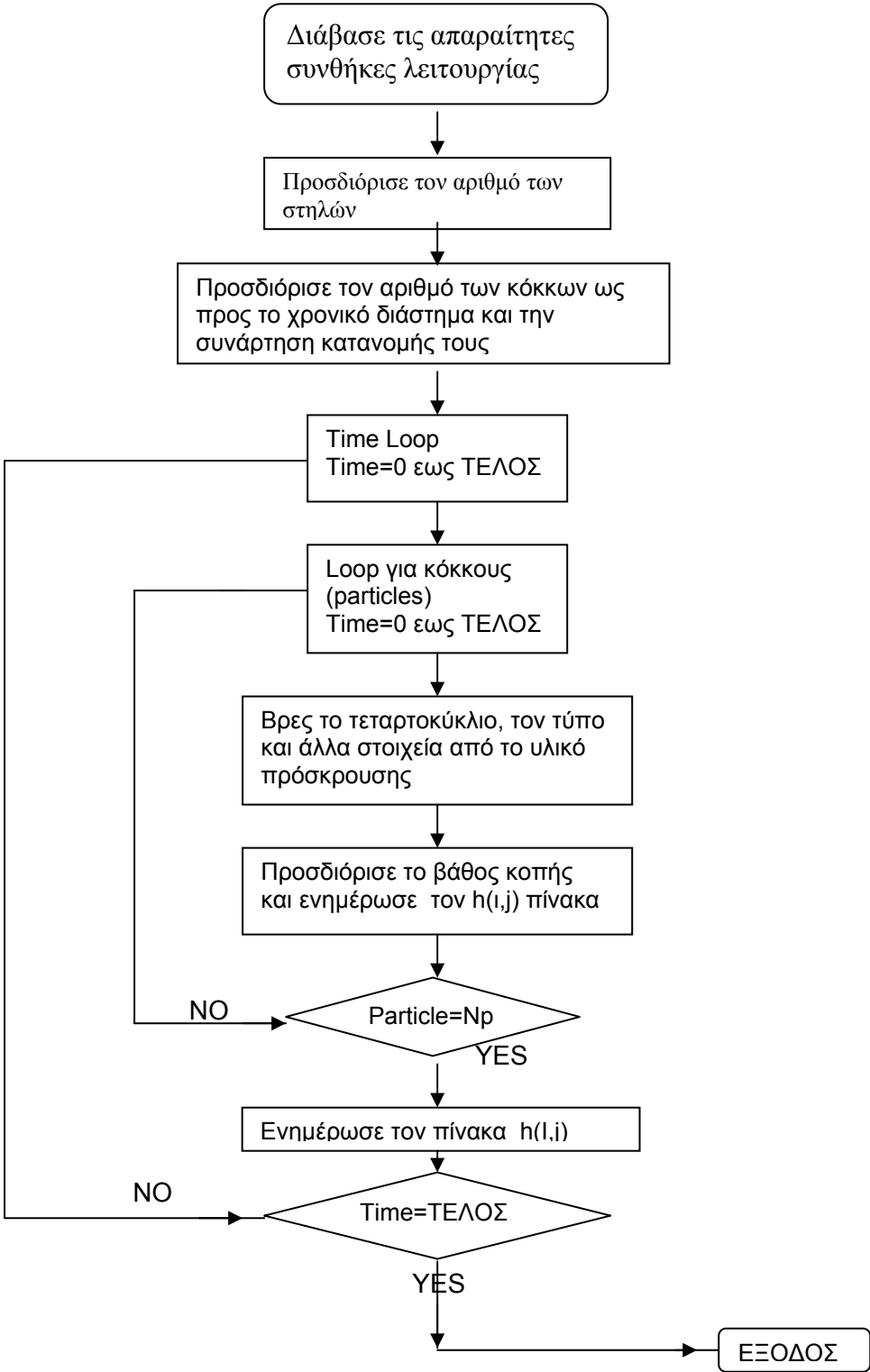
Οι μελετητές χρησιμοποιούν το μοντέλο του Finnie. Η περιοχή πρόσπτωσης στο υλικό-στόχος χωρίζεται σε τέσσερα τεταρτοκύκλια και σε ένα αριθμό γραμμών και στηλών. Το μοντέλο ορίζει τρεις αρχικούς τύπους πρόσπτωσης: τη γραμμή τοίχο, τη στήλη τοίχο και τη στοιχειώδη επιφάνεια. Στο σχήμα 3.14 φαίνεται στο διάγραμμα ροής η πορεία του προγράμματος FORTRAN. Το πρόγραμμα αντανακλά, τουλάχιστον ποιοτικά, την επίδραση του ρυθμού ροής της μάζας των κόκκων πάγου, το χρόνο διάτρησης και την οριζόντια μετακίνηση της δέσμης. Παρόλα αυτά, ο χρόνος υπολογισμού είναι πάρα πολύ μεγάλος ακόμα κι αν ο αριθμός των στοιχείων είναι μικρός.

Παραθέτουμε έναν πίνακα από μελέτη αφαίρεσης υλικού με AWJ από τον Mazurkiewicz [23] για να εκτιμήσουμε την αποτελεσματικότητα του μοντέλου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.9 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ ΜΑΖΑΣ

Βήμα	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ
1	<p>Δεδομένα εισόδου: $d_{jet} = 1.5 \text{ mm}$ $l_A = 315 \text{ mm}$ $v = 5 \text{ m/sec}$ $d_o = 0.35 \text{ mm}$ $h = 10 \text{ mm}$ υλικό = αλουμίνιο $v_p = 200 \text{ m/sec}$ $\sigma_f = 1.38 \text{ MPa}$ $d_p = 425 \text{ }\mu\text{m}$ $\rho_M = 2700 \text{ Kgr/m}^3$</p>
2	<p>Αποστάσεις μεταξύ κόκκων: $x_p = d_p + l_A = 0.425 + 0.315 = 0.74 \text{ }\mu\text{m}$</p>
3	<p>Αριθμός στηλών που διαμορφώθηκαν από κόκκους στο μισό απ' το μπροστινό μέρος κοπής της περιφέρειας της δέσμης: $N_{col} = \frac{\pi \cdot d_{jet}}{2 \cdot x_p} = \frac{\pi \cdot 1.5}{2 \cdot 0.74} = 3.18 \text{ στήλες}$</p>
4	<p>Αριθμός κόκκων λειαντικού μέσου σε μια στήλη σε ένα δευτερόλεπτο κοπής ($t = 1 \text{ sec}$): $N_p = \frac{v_p}{x_p} = \frac{200 \cdot 10^3}{0.74} = 270.270 \text{ κόκκοι}$</p>
5	<p>Όγκος υλικού που διαβρώθηκε κατά την πάροδο χρόνου $t = 1 \text{ sec}$: $V_M = \left[d_{jet} \cdot s_t + \frac{\pi \cdot d_{jet}^2}{8} \right] \cdot h = \left[(1 \cdot 5 \cdot 5) + \frac{\pi \cdot (1.5)^2}{8} \right] \cdot 10 = 88.33 \text{ mm}^3$</p>
6	<p>Λειαντικοί κόκκοι που έλαβαν μέρος στην αφαίρεση όγκου V_M: $N_{pv} = N_{col} \cdot N_p = 3.18 \cdot 270.270 = 859.458 \text{ κόκκοι.}$</p>
7	<p>Όγκος που αφαιρείται από ένα μόνο κόκκο: $V_{MA} = \frac{V_M}{N_{vp}} = \frac{88.83}{859.458} = 9.754 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{κόκκο}$</p>
8	<p>Μάζα που αφαιρείται από ένα μόνο κόκκο:</p>

	$M_A = V_{AM} \cdot \rho_M = 9.754 \cdot 10^{-5} \cdot 2700 = 0.263 \text{gr} / \text{κόκκο}$
9	Μάζα που αφαιρείται από ένα μόνο κόκκο υπολογισμένη σύμφωνα με τον Finnie $M_A = \left[\frac{\rho_M}{\phi \cdot \sigma_f} \right] \cdot \frac{m_p \cdot v_p^2}{2} \cdot [\sin(2 \cdot \phi) - 3 \cdot \sin^2 \phi]$ $M_A = \left[\frac{2.7}{2 \cdot 13800 \cdot 10^5} \right] \cdot \frac{6.11 \cdot 10^4 \cdot 200^2 \cdot 10^6}{2} \cdot 0.0312 = 0.373 \text{gr} / \text{κόκκο}$



Σχήμα 3.14 Διάγραμμα ροής για την προσομοίωση κοπής.

3.6.2 Μοντέλο αριθμητικής μεθόδου

Οι Yong και Konavecic [24] ανέπτυξαν ένα μοντέλο, αριθμητικής μεθόδου για κατεργασία AWJ, το οποίο καλύπτει αρκετά σημαντικά θέματα αυτής της κατεργασίας όπως είναι η προσομοίωση ροής λειαντικού σε φάσεις, καταγραφή των ιχνών των λειαντικών κόκκων και η μεταφορά ενέργειας σ' ένα υλικό που ονομάζεται «κελί μνήμης». Το μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί για κατεργασία IWJ.

Τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων που συνδέεται με εξισώσεις μετασχηματισμών συνθέτουν τη κινηματική συμπεριφορά των κόκκων. Στο σχήμα 3.15 υπάρχει ένα δίκτυο το οποίο χωρίζει την επιφάνεια που πρόκειται να κοπεί στο τεμάχιο. Επίσης, στο σχήμα αυτό μπορούμε να δούμε πως κάθε στοιχείο του δικτύου θεωρείται «κελί μνήμης». Το μοντέλο χρησιμοποιεί την πληροφορία που καταγράφεται σε κάθε τέτοιο κελί για την πορεία των κόκκων πάγου για να προβλέψουμε το βάθος κοπής στο σημείο (x_i, y_i, z_i) .

Εάν μέσα σ' ένα κελί έχουν εισέλθει N_p κόκκοι πάγου, η συνολική κινητική ενέργεια E_k είναι:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{N_p} [m_{p_i}(t_i) \cdot v_{p_i}^2(t_i, x_i, y_i, z_i)] \quad (3.56)$$

όπου $m_{p_i}(t_i)$ και $v_{p_i}(t_i, x_i, y_i, z_i)$ είναι αντίστοιχα η μάζα και η ταχύτητα ενός κόκκου στη χρονική στιγμή t_i . Η συντεταγμένη z είναι το βάθος κατά την κατεύθυνση κοπής.

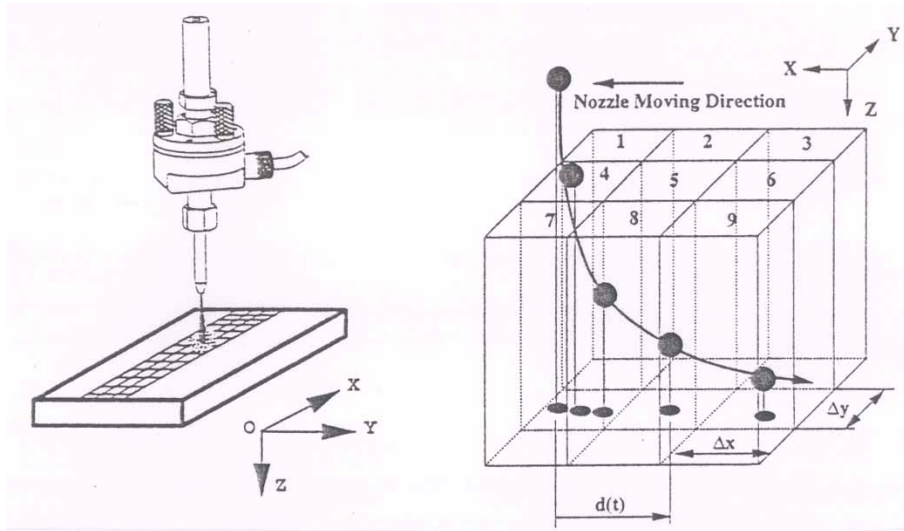
Το επόμενο βήμα είναι η μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κόκκων στο κελί και ο υπολογισμός του βάθους κοπής για κάθε κελί σαν αποτέλεσμα του μοντέλου. Η σχέση που δίνει το βάθος κοπής για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

$$\begin{aligned} h &= f(c_1, c_2, \dots, c_j) \cdot v_{p_z}^k(h) \geq 0, \\ f(c_1, c_2, \dots, c_j) &> 0 \end{aligned} \quad (3.57)$$

Στη σχέση αυτή, k είναι μια σταθερά (συνήθως μεταξύ 2 και 3) και $c_j = c_j(t, x_j, y_j, z_j)$ ($j = 1, \dots$) ισχύει για κάθε γενική παράμετρο όπως ο τύπος του λειαντικού και η αντίσταση του υλικού. Μετά από πάροδο χρόνου Δt ισχύει:

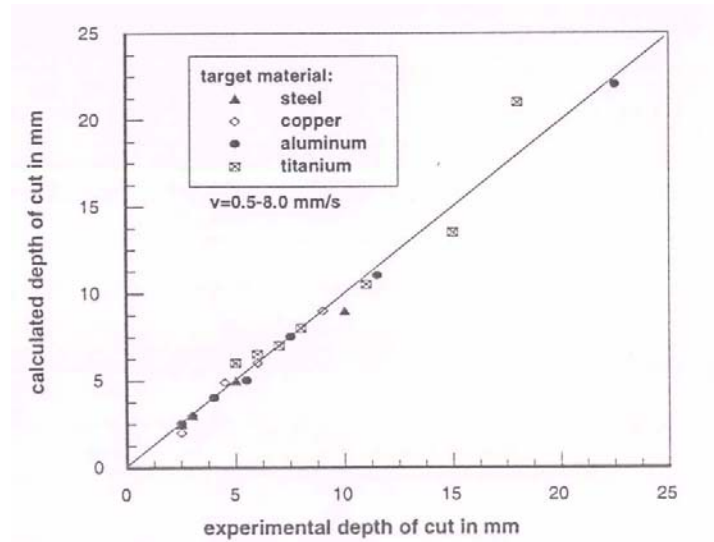
$$\Delta h = \frac{v_{Pz}^k \sum_{i=1}^j \left[\frac{\partial f}{\partial c_i} \cdot \Delta c_j \right]}{1 - k \cdot f \cdot v_{Pz}^{k-1} \cdot \frac{\partial v_{Pz}}{\partial h}} \quad (3.58)$$

Στη σχέση αυτή ο όρος $\frac{\partial v_{Pz}}{\partial h}$ χαρακτηρίζει την απώλεια της ταχύτητας των κόκκων εξαιτίας της τριβής, της υγρασίας και της πρόσκρουσης σε βαθιές κοιλότητες. Οι εξισώσεις (3.57) και (3.58) υπολογίζονται με αριθμητικούς αλγόριθμους για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματικότητά τους σε διαφορετικές συνθήκες.



Σχήμα 3.15 Βασικά στοιχεία από το μοντέλο Yong – Kovacevic

Από την πειραματική εφαρμογή του αλγόριθμου φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (βλ. σχήμα 3.16) η σύγκριση μεταξύ πειραματικού υπολογισμού του βάθους κοπής και της προσομοίωσης. Το μοντέλο εφαρμόζεται εκτός της κατεργασίας κοπής για κατεργασίες διάτρησης και φρεζαρίσματος.



Σχήμα 3.16 Επαλήθευση του μοντέλου Yong - Kovacevic

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ICE-WATER JET MACHINING

4.1 Ορισμός των παραμέτρων

Από την βιβλιογραφία – σχετικά με το αντικείμενό μας. Οι παράμετροι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις παραμέτρους διαδικασίας και στις παραμέτρους στόχου.

Στις παραμέτρους διαδικασίας ανήκει ένα ευρύ σύνολο που καλύπτουν όλη τη διαδικασία της κατεργασίας όπως η αποτελεσματικότητα, η οικονομία και η ποιότητα της διαδικασίας.

Στις παραμέτρους στόχου ανήκουν στο βάθος κοπής, ο ρυθμός κοπής, ο όγκος το υλικού που απομακρύνεται και ο ρυθμός ροής νερού και κόκκων πάγου στη δέσμη.

4.1.1 Παράμετροι διαδικασίας

- σχήμα κόκκων
- σκληρότητα κόκκων (H_p)

4.1.2 Παράμετροι στόχου

Η πιο σημαντική απ' όλες τις παραμέτρους στόχου είναι το βάθος κοπής, h , ή το πάχος του τεμαχίου προς κατεργασία h_s , αφού η σχέση που ενώνει τα δύο μεγέθη είναι:

$$h_s = 0.8 \cdot h \quad (4.1)$$

Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 4.2.

Άλλη παράμετρος είναι ο ρυθμός κοπής που δίνεται από τη σχέση:

$$A_h = h \cdot v \quad (4.2)$$

Το μέγεθος A_h εκφράζει την περιοχή που δημιουργείται σε μια χρονική περίοδο. Για ιδεατά πάχη, ο ρυθμός κοπής διαφοροποιείται αφού εξαρτάται επίσης κι από την οριζόντια μετακίνηση του ακροφυσίου.

Στις εφαρμογές αφαίρεσης υλικού, όπως το φρεζάρισμα και η τόννευση, σημαντικό ρόλο παίζει ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται.

Σ' ορισμένες περιπτώσεις ο όγκος υπολογίζεται ως εξής:

$$V_M = h \cdot b_h \cdot L_h \quad (4.3)$$

όπου b_h = πλάτος κοπής και βάθος h , και

L_h = μήκος κοπής

Συνήθως ο όγκος που έχει απομακρυνθεί υπολογίζεται με το να γεμίσουμε τις δημιουργηθείσες κοιλότητες μ' ένα ορισμένο υλικό. Έτσι ο ρυθμός απομάκρυνσης όγκου είναι:

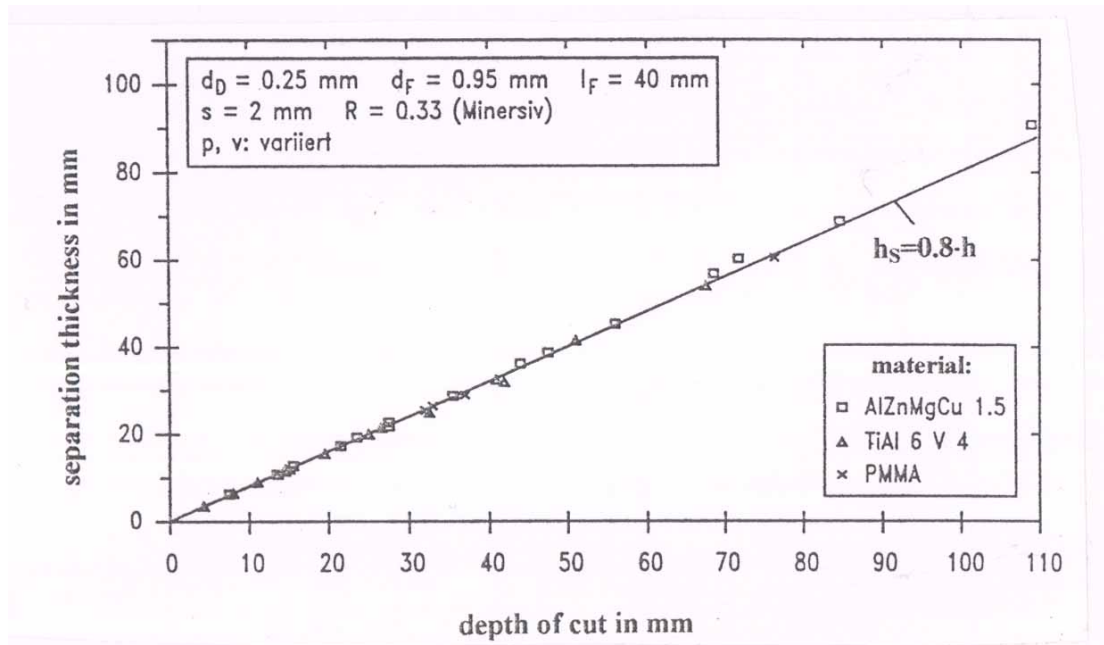
$$\dot{V}_M = h \cdot b_n \cdot h \cdot v = \frac{V_M}{t_E} \quad (4.4)$$

όπου b_n = πλάτος κοπής που επιτεύχθηκε τη χρονική στιγμή t_E

Για βελτιστοποίηση της διαδικασίας της κατεργασίας, λαμβάνουμε υπόψη το ρυθμό ροής του όγκου νερού και του ρυθμού ροής της μάζας των κόκκων τα οποία εξαρτώνται απ' την πίεση της αντλίας και της διαμέτρου του ακροφυσίου.

Ο ρυθμός κοπής για βελτιστοποίηση με βάση το ρυθμό ροής μάζας κόκκων πάγου είναι:

$$A_{hA} = \frac{A_n}{m_A} = \frac{h \cdot v}{m_A} \quad (4.5)$$

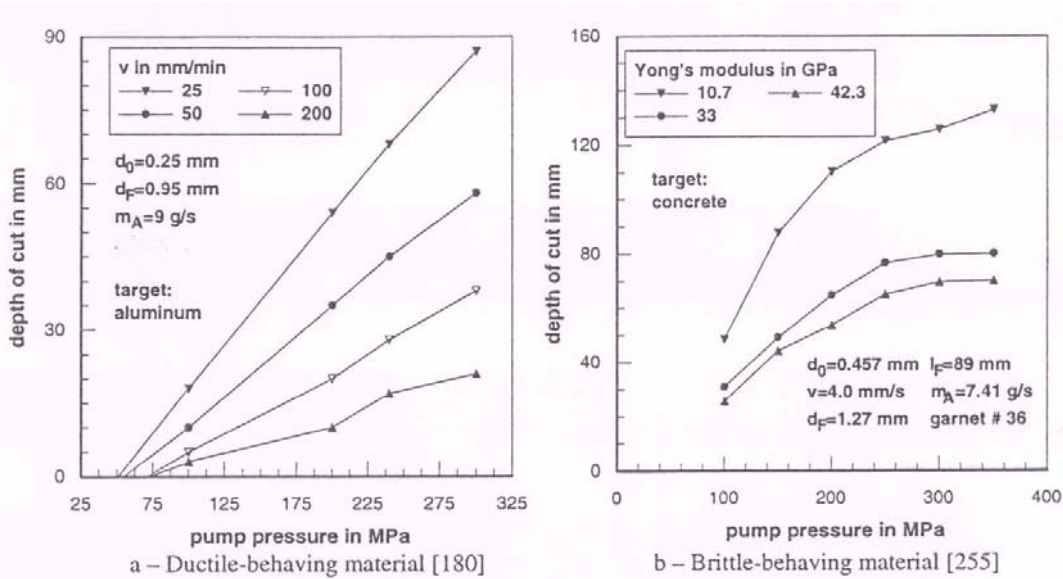


Σχήμα 4.2 Σχέση ανάμεσα στο βάθος κοπής και στο πάχος τεμαχίου.

4.2 Επίδραση των Υδραυλικών Παραμέτρων Διαδικασίας

4.2.1 Επίδραση της πίεσης της αντλίας

Η σχέση ανάμεσα στην πίεση της αντλίας και το βάθος κοπής περιγράφεται γραφικά από το σχήμα 4.3 και τη σχέση (4.6).



Σχήμα 4.3 Σχέση ανάμεσα στην πίεση αντλίας και στο βάθος κοπής.

$$h(p) = C_1 \cdot (p - p_{thr})^{C_2} \quad (4.6)$$

$$C_1 = \frac{\Delta h}{\Delta p}$$

Η δομή αυτής της συνάρτησης προέκυψε από τη μελέτη των σχέσεων μεταξύ της πίεσης της αντλίας, της διαδικασίας διαμόρφωσης της δέσμης, της επιτάχυνσης των κόκκων, της ανάμιξής τους με το νερό και της απομάκρυνσης του υλικού.

Γενικά, μπορούμε εύκολα να θεωρήσουμε ότι όσο αυξάνεται η πίεση της αντλίας τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα της δέσμης. Πειραματικά όμως, η άποψη αυτή διαφοροποιείται. Έτσι αν παρατηρήσουμε στο σχήμα 4.3 η αύξηση της συνάρτησης της ταχύτητας μειώνεται με την αύξηση της πίεσης. Η ταχύτητα $v = 200$ mm/min στο 4.3α είναι πολύ χαμηλότερα από την $v = 25$ mm/min. Υπάρχουν δύο παράμετροι: η μ (παράμετρος αποδοτικότητας) και ο κ . συντελεστής συμπίεστικότητας οι οποίοι σχεδόν γραμμικά μειώνονται με την αύξηση της πίεσης. Έτσι:

$$v_o(p) = \sqrt{2} \cdot \mu(p) \cdot \sqrt{\frac{p}{\rho_w(p)}} \quad (4.7)$$

Επίσης παρόμοια περιπλοκότητα παρουσιάζεται και στη σχέση της πίεσης της αντλίας με την διαδικασία ανάμιξης. Όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την ταχύτητα των κόκκων εξαρτώνται από την πίεση. Η πίεση της αντλίας επηρεάζει τον ρυθμό ροής της μάζας των κόκκων, επίσης και την ταχύτητα ροής του αέρα για την

είσοδο των κόκκων στο τμήμα ανάμιξης. Από πειραματικές αποδείξεις των παραπάνω έχουμε:

$$v_p(p) = n_T(p) \cdot \frac{v_o(p)}{1 + \frac{\dot{m}_A(p)}{\dot{m}_W(p)}} \quad (4.8)$$

Συμπερασματικά καταλήγουμε ότι η εξίσωση (4.6) καλύπτει όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις και ισχύει και για κοπή αλλά και για κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (φρεζάρισμα, τόννευση).

Από τη μελέτη του σχήματος 4.3 μπορούμε να διακρίνουμε τρία στάδια:

(α) Πρωταρχικό στάδιο $P < P_{thr}$ όπου P_{thr} είναι μια τιμή που λειτουργεί σαν κατώφλιο και η οποία πρέπει να ξεπεραστεί για να υπάρξει αφαίρεση υλικού. Κατά το στάδιο αυτό δεν συμβαίνει αφαίρεση υλικού. Γραφικά στο σχήμα είναι το κενό διάστημα από την αρχή των αξόνων μέχρι ν' αρχίσουν οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων. Η τιμή P_{thr} εξαρτάται από το ρυθμό ροής κόκκων, την οριζόντια μετακίνηση του ακροφυσίου, τη διάμετρο του ακροφυσίου, τη διάμετρο εστίασης και ακόμα κι αν έχει υπολογιστεί κάποια τιμή της για συγκεκριμένο υλικό έχει την ιδιότητα να διαφοροποιείται ανάλογα με την πορεία της κατεργασίας κάθε φορά.

(β) Γραμμικό στάδιο όπου $P_{thr} < P < P_{Cr}$. Στο στάδιο αυτό το βάθος κοπής αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της πίεσης της αντλίας, με κάποιο λόγο αναλογίας $\frac{dh}{dp} > 1$ (ο οποίος εξαρτάται, βέβαια, από το υλικό του τεμαχίου). Στο στάδιο αυτό $C_2 = 1$.

(γ) Στάδιο μείωσης όπου $P > P_{Cr}$. Εδώ η συνάρτηση αρχίζει να φθίνει και ισχύει $0 < C_2 < 1$. Η συμπεριφορά είναι χαρακτηριστική για υψηλές πιέσεις σε ημιψαθυρά υλικά όπως μπετόν, πετρώματα και κεραμικά. Η πίεση $P = P_{Cr}$ είναι όριο όπου η κατεργασία είναι αποδοτική. Η απόκλιση απ' αυτή την τιμή επηρεάζει αρνητικά την αποτελεσματικότητά της.

Εάν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (4.6) και $E_A \propto p^{1.5}$ όπου E_A : κινητική ενέργεια δέσμης, μπορούμε να υπολογίσουμε την αφαίρεση υλικού. Για να έχουμε αποτελεσματική κατεργασία πρέπει η ειδική ενέργεια $E_{Sp} = \frac{E_A}{h}$ να παρουσιάζει minimum. Δηλ.

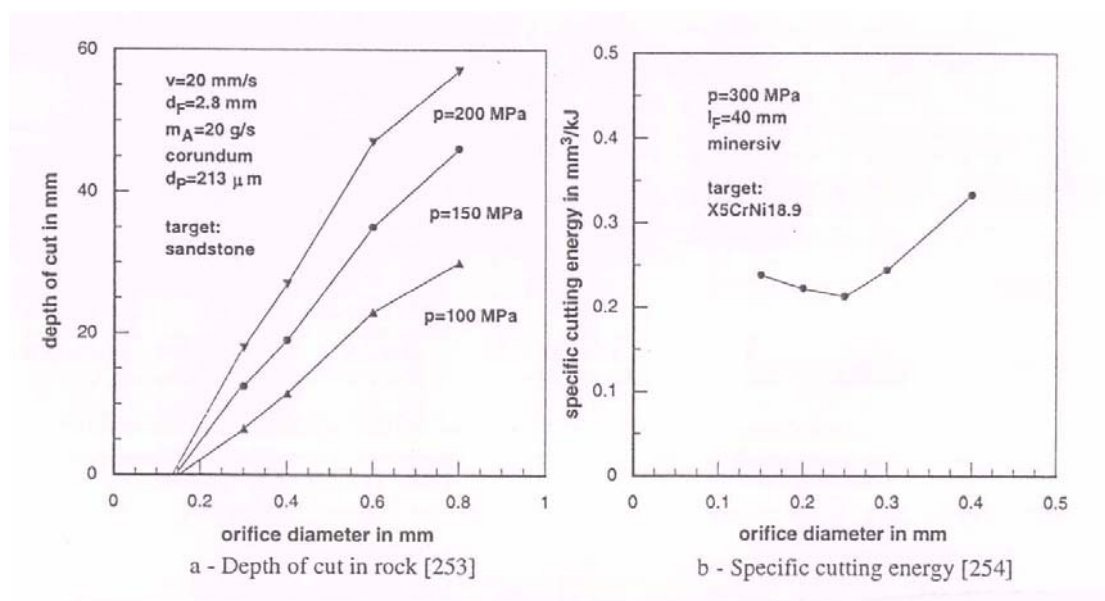
$$\frac{dE_A}{dh} = \frac{d(C_2 \cdot p^{1.5})}{d[C_1 \cdot (p - p_{thr})]} = 0 \quad (4.9)$$

Κι από την επίλυσή της:

$$\rho(E_{Sp \text{ min}}) = 3 \cdot p_{thr} \quad (4.10)$$

Με πίεση περίπου τριπλάσια του ορίου P_{thr} , η αποδοτικότητα της κατεργασίας γίνεται μέγιστη ενώ η ειδική ενέργεια αφαίρεσης υλικού και η ειδική ενέργεια κοπής έχουν ελάχιστες τιμές.

4.2.2 Επίδραση της Διαμέτρου του Ακροφυσίου



Σχήμα 4.4 Σχέση ανάμεσα στη διάμετρο του ακροφυσίου και τα αποτελέσματα κοπής

Παρατηρώντας το σχήμα 4.4, υπάρχει μια τυπική σχέση μεταξύ του βάθους κοπής και της διαμέτρου του ακροφυσίου. Η αύξηση της διαμέτρου, αυξάνει το βάθος κοπής αλλά αυτή η αύξηση της συνάρτησης πέφτει για μεγάλες διαμέτρους ακροφυσίου. Μια μαθηματική έκφραση αυτής της σχέσης είναι:

$$h(d_o) = C_4 \cdot d_o^{C_5} \quad \text{με } 0 < C_5 < 1 \quad (4.11)$$

Για τιμές διαμέτρου ακροφυσίου μικρές και μεσαίες, η κατεργασία είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγές στην παράμετρο αυτή. Η ικανότητα μεταφοράς ταχύτητας της δέσμης νερού και η ταχύτητα των κόκκων αυξάνεται με μεγαλύτερες διαμέτρους ακροφυσίου. Η σχέση ταχύτητας κόκκων και η διάμετρος ακροφυσίου είναι:

$$v_p(d_o) \propto \frac{V_o}{1 + \frac{C_{\text{onst}}}{d_o^2}} \quad (4.12)$$

Η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου πέρα από κάποια τιμή δεν βελτιώνει την ταχύτητα των κόκκων. Αντίθετα σύμφωνα με μελέτες και πειράματα των Blickwedel, Guo, Hebling η πρόοδος του βάθους κοπής φθίνει σε μεγάλες διαμέτρους.

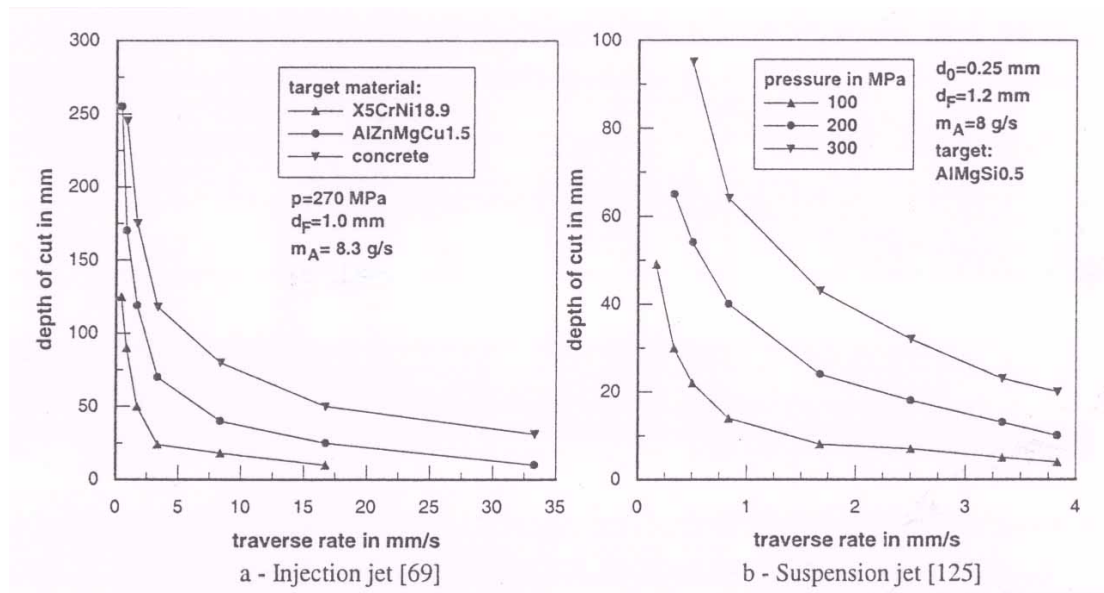
Αρκετοί μελετητές προτείνουν την ύπαρξη ενός κατωφλίου διαμέτρου του ακροφυσίου d_{thr} , γιατί ακόμα κι αν απορρίψουν την ύπαρξή του τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν καθαρά ότι τουλάχιστον μια σειρά από πολύ μικρά βάθη κατεργασίας υπάρχουν για πολύ μικρές διαμέτρους ακροφυσίου. Στις τιμές αυτές η δύναμη του ρεύματος νερού είναι πολύ μικρή για να επιταχύνει επαρκώς τους κόκκους. Γι' αυτό λοιπόν, προτείνεται μια ελάχιστη διάμετρος για να μπορεί να πετύχει αποτελεσματική επιτάχυνση.

Για μια δεδομένη ροής μάζας κόκκων υπάρχει μια βέλτιστη διάμετρος ακροφυσίου. Στο σχήμα 4.4.b φαίνεται αυτό. Παρατηρούμε ότι υπάρχει βέλτιστη διάμετρος d_{opt} με τιμή περίπου $d_{\text{opt}} = 2.5 \cdot d_{\text{thr}}$ που δείχνει βέλτιστες συνθήκες για ισορροπία μεταξύ πίεσης της αντλίας και διαμέτρου ακροφυσίου. Περαιτέρω, εάν απαιτείται βέλτιστη αναλογία μεταξύ ροής νερού και κόκκων τότε κάθε αλλαγή διαμέτρου του ακροφυσίου απαιτεί ρύθμιση για την πραγματική ροή των κόκκων.

Απ' την πλευρά της κατανάλωσης νερού και της εκμετάλλευσής του είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται ακροφύσια μέσης διαμέτρου. Η περιοχή που κατεργαζόμαστε ανά δεδομένο όγκο νερού μειώνεται με ακροφύσιο μεγάλης διαμέτρου.

4.3 Επίδραση των Παραγόντων Κοπής

4.3.1 Επίδραση της οριζόντιας κίνησης του ακροφυσίου



Σχήμα 4.5 Σχέση ανάμεσα στο ρυθμό οριζόντιας μετακίνησης ακροφυσίου και στο βάθος κοπής

Η σχέση ανάμεσα στην οριζόντια μετακίνηση του ακροφυσίου και του βάθους κοπής φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η εξάρτηση των δύο μεγεθών είναι πολύ σημαντική για μικρές ταχύτητες οριζόντιας μετακίνησης ενώ για μεγάλες ταχύτητες, το βάθος κοπής σχεδόν πλησιάζει την τεταγμένη. Μια απλή μαθηματική έκφραση είναι:

$$h(v) = C_7 \cdot v^{C_8}, \quad C_8 < 1 \quad (4.13)$$

Στη σχέση αυτή ο C_8 είναι ένας αρνητικός αριθμός με τιμές $-1.0 < C_8 < -0.4$. Σύμφωνα με τον Blickwedel [10] υπάρχει μια ακριβέστερη προσέγγιση για τη σχέση μεταξύ C_8 και v .

$$h(v) = C_7 \cdot v^{-\left(0.86 + \frac{2.09}{v}\right)} \quad (4.14)$$

Η σταθερά C_7 εξαρτάται από άλλες παραμέτρους διαδικασίας όπως: πίεση αντλίας, ρυθμός ροής κόκκων, διάμετρος ακροφυσίου και διάμετρο σχήματος κόκκων.

Σύμφωνα με τους Momber και Kovacevic [25] προτείνεται ένα άλλο μαθηματικό μοντέλο:

$$h(v) = h_{\max} \cdot \left[-\left(\frac{\ln v}{\ln v_{cr}} \right) + 1 \right] \quad (4.15)$$

όπου v_{cr} είναι μια κρίσιμη τιμή οριζόντιας ταχύτητας για $h = 0$. Το βάθος κοπής μειώνεται σημαντικά για υψηλές ταχύτητες οριζόντιας μετακίνησης.

Η μεγαλύτερη επίδραση της οριζόντιας μετακίνησης στην κατεργασία είναι ο προσδιορισμός του χρόνου κατεργασίας.

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (4.16)$$

που οδηγεί στο:

$$t = \frac{1}{v} \cdot \int_0^x dx = \frac{x}{v} \quad (4.17)$$

Για δεδομένο ρυθμό ροής κόκκων, η αύξηση της ταχύτητας της οριζόντιας μετακίνησης οδηγεί σε μείωση του αριθμού των κόκκων που προσκρούουν στο τεμάχιο καθώς και σ' εκείνα που υπάρχουν στον όγκο του νερού που δημιουργεί τη διάβρωση. Παρόλα αυτά, η μείωση της μάζας των κόκκων δεν είναι ο μόνος λόγος της μειωμένης αποδοτικότητας της κατεργασίας. Άλλη επίδραση της οριζόντιας μετακίνησης είναι η επίδρασή της στην διάβρωση στο κάτω μέρος (πυθμένα) της κοπής ή της κατεργασίας. Αυτή η επίδραση είναι σημαντική στις μικρές ταχύτητες οριζόντιας μετακίνησης.

Η εξίσωση που δίνει τη σχέση μεταξύ οριζόντιας μετακίνησης και ρυθμού κοπής είναι:

$$A_h(v) = C_9 \cdot v^{C_{10}} \cdot e^{C_{11} \cdot v} \quad (4.18)$$

Η εξίσωση είναι ευαίσθητη σε αλλαγές στη μηχανουργική κατεργασία. Η σχέση αυτή επίσης υπολογίζει το ρυθμό απομάκρυνσης υλικού.

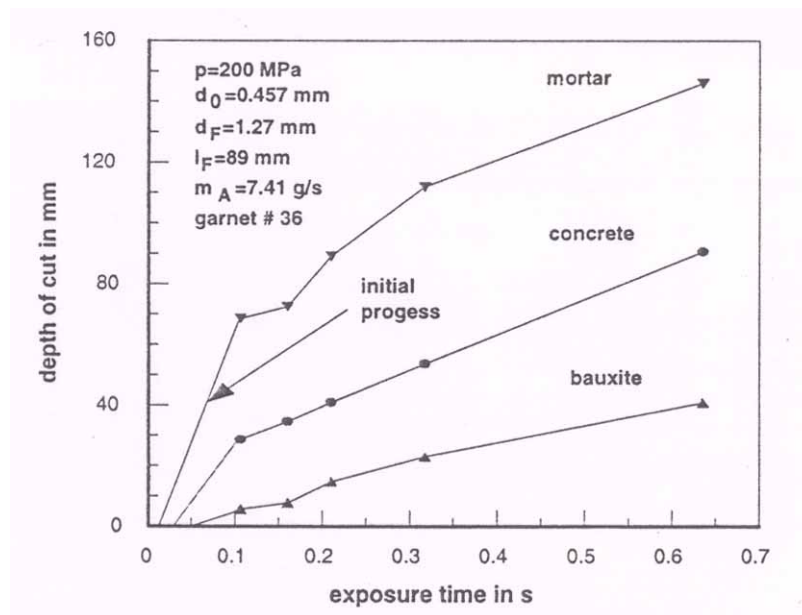
Για την ειδική περίπτωση $C_{10} = C_{11} = 0$ η εξίσωση δίνει $A_h =$ σταθερή. Για να υπολογίσουμε το maximum του ρυθμού κοπής:

$$\frac{dA_h}{dv} = 0 \rightarrow v_{opt} = \frac{-C_{10}}{C_{11}} \quad (4.19)$$

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του Hebling [26] κάτω από ιδανικές συνθήκες κατεργασίας οι τιμές της Volt είναι πολύ μεγαλύτερες για απλή δέσμη νερού σε σύγκριση με AWJM και IWJM. Αυτή η παρατήρηση δείχνει ότι οι προσκρούσεις των κόκκων κατά τη διάρκεια της κίνησής τους παίζουν σημαντικό ρόλο στην πορεία της κατεργασίας.

4.3.2 Επίδραση του αριθμού των περασμάτων (πάσσεων)

Ο αριθμός των περασμάτων περιγράφουν την κατεργασία κοπής με πολλά περάσματα. Η βάση γι' αυτή τη στρατηγική αφαίρεσης υλικού είναι η σχέση ανάμεσα στο βάθος κοπής και στο χρόνο κατεργασίας όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Σ' αυτό το σχήμα, οι βέλτιστες συνθήκες κοπής υπάρχουν σε πολύ μικρούς χρόνους κατεργασίας t_{opt} . Για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα η αποδοτικότητα φθίνει εξαιτίας της επίδρασης των προσκρούσεων και των τριβών. Αυτές οι αρνητικές επιδράσεις μπορούν να αποφευχθούν και η αποτελεσματικότητα να αυξηθεί με το να κοπεί το τεμάχιο αρκετές φορές με συγκριτικά υψηλούς ρυθμούς οριζόντιας μετακίνησης. Σαν αποτέλεσμα, εμφανίζεται maximum τιμή στο ρυθμό κοπής.



Σχήμα 4.6 Σχέση ανάμεσα στο χρόνο κατεργασίας και το βάθος κοπής.

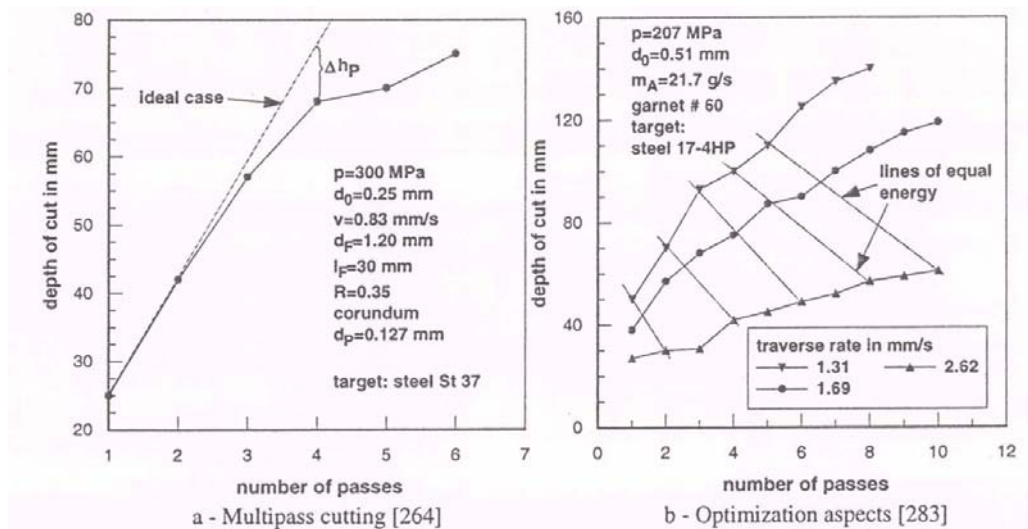
Ο βέλτιστος ρυθμός οριζόντιας μετακίνησης είναι:

$$v_{opt} = \frac{Lh}{t_{opt}} \quad (4.20)$$

Ο βέλτιστος αριθμός από περάσματα n_{popt} είναι:

$$n_{popt} = f(v) = \frac{t}{t_{opt}} = \frac{v_{opt}}{v} \quad (4.21)$$

όπου $n_p \in (G)$



Σχήμα 4.7 Σχέση ανάμεσα στον αριθμό των πάσων και το βάθος κοπής.

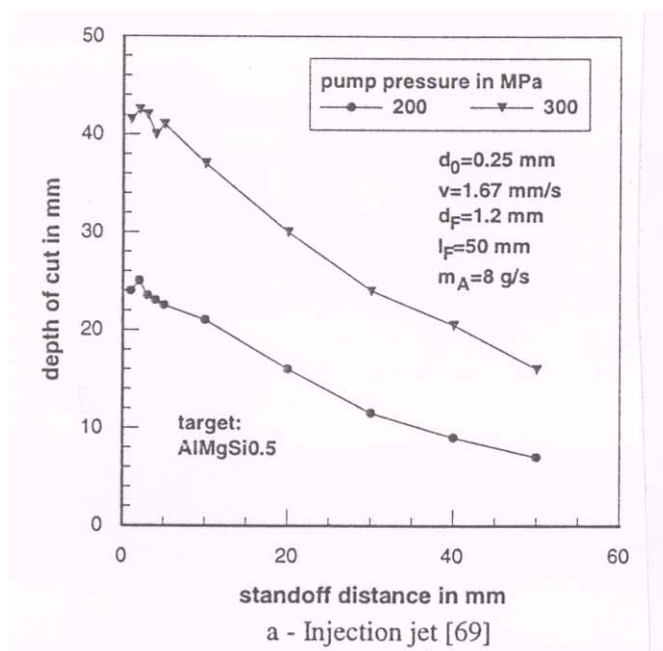
Στο σχήμα 4.7α βλέπουμε τη σχέση ανάμεσα στον αριθμό των περασμάτων και στο βάθος κοπής. Η σχέση στην αρχή είναι σχεδόν γραμμική αλλά στη συνέχεια η πρόοδος φθίνει μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό περασμάτων. Αν προσθέσουμε ευθείες ίσης ενέργειας όπως στο διάγραμμα 4.7b ένας βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ του αριθμού των περασμάτων και της οριζόντιας μετακίνησης μας οδηγεί στο μέγιστο βάθος κοπής. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην ισορροπία ανάμεσα στις αποσβέσεις ταχύτητας λόγω προσκρούσεων των κόκκων και στην τριβή που αναπτύσσεται στα τοιχώματα σ' ένα συγκεκριμένο βάθος κοπής. Η διαφορά μεταξύ του υπολογισμένου βάθους κοπής και του βάθους κοπής που θεωρείται από την ιδεατή γραμμική σχέση μεταξύ του βάθους κοπής και του αριθμού των περασμάτων, Δh_p , είναι αποτελέσματα της τριβής. Μετά από έναν αριθμό περασμάτων, n_{cr} , οι απώλειες της τριβής γίνονται σημαντικές και καλύπτουν τη θετική επίδραση της μείωσης των προσκρούσεων.

Ο ρυθμός κοπής σχεδόν γραμμικά μειώνεται με αύξηση του αριθμού των περασμάτων. Γι' αυτό η στρατηγική με πολλά περάσματα (multi-pass strategy) είναι αποτελεσματική για βαθιές κατεργασίες. Επίσης η στρατηγική είναι ανεπαρκής όταν θέλουμε υψηλούς ρυθμούς κοπής.

4.3.3 Επίδραση του μήκους της δέσμης

Οι περισσότεροι απ' τους μελετητές επιβεβαιώνουν ότι το βάθος κοπής μειώνεται σχεδόν γραμμικά όσο αυξάνεται το μήκος της δέσμης. Στο σχήμα 4.8 βλέπουμε ένα τυπικό παράδειγμα. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται:

$$h(x) = C_{12} \cdot x^{C_{13}} \quad \text{όπου } C_{13} < 0 \quad (4.22)$$



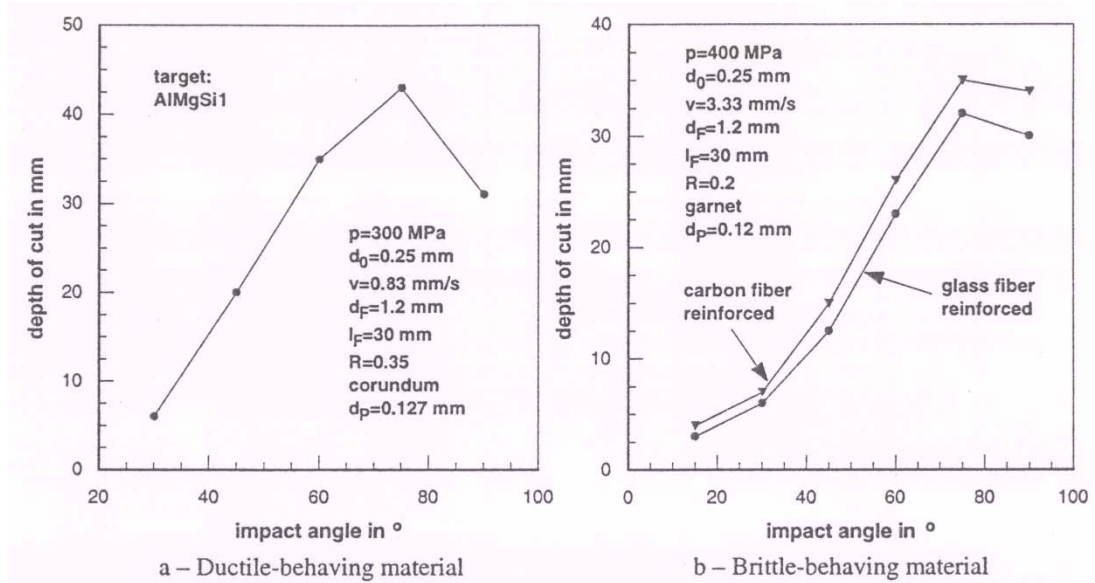
Σχήμα 4.8 Σχέση ανάμεσα στο μήκος της δέσμης και το βάθος κοπής.

Αλλαγές στο μήκος της δέσμης δεν αλλάζουν σημαντικά την ταχύτητα των κόκκων. Γι' αυτό το βέλτιστο μήκος δέσμης που παρατηρείται στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού είναι αποτέλεσμα της ακτινοειδούς εκτόνωσης των κόκκων που καταλήγουν σε μεγαλύτερη περιοχή πρόσπτωσης. Η γενικότερη αύξηση του πλάτους κοπής συνδέεται με αύξηση του μήκους της δέσμης.

Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις οι μελετητές παρατηρούν ακρότατο στις συναρτήσεις βάθους κοπής. Αυτό εξηγείται ως εξής: εάν η απόσταση ανάμεσα στην έξοδο του σωλήνα και το τεμάχιο προς κατεργασία, είναι μικρή τότε η ροή της δέσμης αποσβένεται ή επιβραδύνεται από την επιφάνεια του τεμαχίου γεγονός που παράγει μικρότερα βάθη κοπής. Για να επεκτείνει αυτή την άποψη ο Oweinah [15] έκανε πειράματα με διαφορετικές γωνίες πρόσκρουσης. Παρατηρεί ότι η συμπεριφορά των ακρότατων συμβαίνει σε γωνίες $\varphi = 90^\circ$. Εάν η γωνία πρόσπτωσης αλλάζει σε $\varphi = 75^\circ$ η επίδραση ακρότατων εξαφανίζεται. Προτείνεται βέλτιστο μήκος δέσμης σε $x_{opt} = 2.0\text{mm}$.

4.3.4 Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης

Εδώ οι μελετητές διέκριναν τα υλικά σε όλκιμα και ψαθυρά και ασχολήθηκαν με την κάθε ομάδα χωριστά.



Σχήμα 4.9 Σχέση ανάμεσα στη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης και το βάθος κοπής.

Όλκιμα υλικά

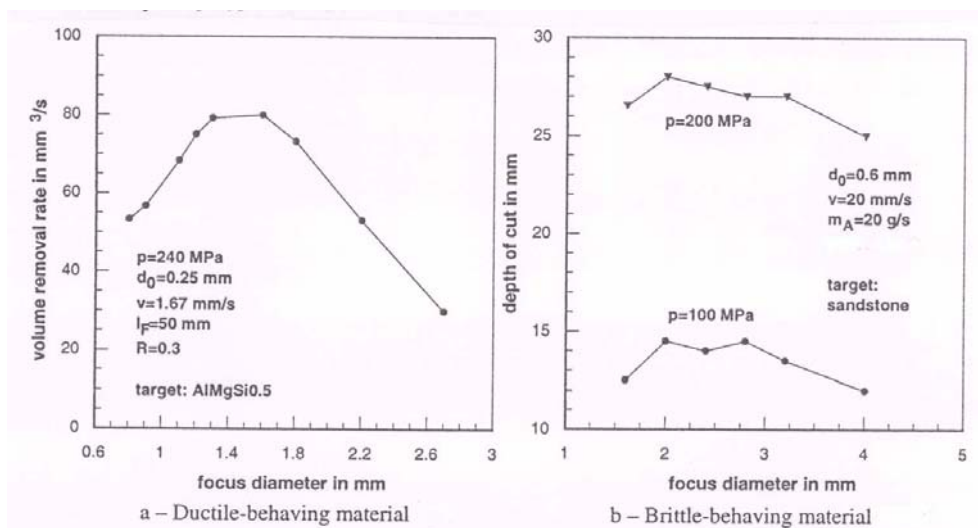
Για μαλακό χάλυβα, παρατηρήθηκε μέγιστο βάθος κοπής σε γωνίες $\varphi = 90^\circ$. Για ανοξειδωτο χάλυβα και αλουμίνιο μέγιστα βάθη κοπής είχαμε στις γωνίες μεταξύ $\varphi = 75^\circ$ και $\varphi = 80^\circ$. Σύμφωνα με τις μελέτες του Hatchings για το μηχανισμό μικροκατεργασιών, προτείνει μια μικρή κλίση της δέσμης για να βελτιωθεί η διαδικασία. Γι' αυτό στη γραμμική κοπή αυτής της ομάδας των υλικών, μια κλίση περίπου 10° αυξάνει το βάθος κοπής.

Ψαθυρά υλικά

Είναι γενικά γνωστό ότι τα πειράματα που έγιναν σε ψαθυρά υλικά συχνά δείχνουν υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης με γωνία πρόσπτωσης $\varphi = 90^\circ$. Αυτό αποδεικνύεται από το σχήμα 4.9b. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας υλικά με μεταλλική δομή παρουσιάζουν σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης συμπεριφορά μικροκατεργασίας κι όσο πλησιάζουμε σε μεγάλες γωνίες συμπεριφορά θρυμματισμού. Για γωνίες $\varphi = 20^\circ$ εμφανίζεται μεγαλύτερη επιφάνεια να θρυμματίζεται απ' ό,τι σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης των κόκκων ($\varphi = 5^\circ$).

4.4 Επίδραση των Παραμέτρων Μίξης

4.4.1 Επίδραση της διαμέτρου εστίασης



Σχήμα 4.10 Σχέση ανάμεσα στη διάμετρο εστίασης και το βάθος κοπής.

Από το σχήμα (βλ. σχ. 4.10) παρατηρούμε ότι το βάθος κοπής μειώνεται με αύξηση της διαμέτρου εστίασης.

Με συσκευές λείζερ μετρήθηκε η ταχύτητα των κόκκων πάγου και παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα μειώνεται καθώς αυξάνεται η διάμετρος εστίασης. Με ανάλυση κατά τη διάρκεια ανάμιξης νερού και κόκκων, ο Blickwedel βρήκε ότι η τελική ταχύτητα των κόκκων εξαρτάται από την πυκνότητα του μίγματος νερού-κόκκων: όσο πιο πυκνό το μίγμα, τόσο πιο μεγάλη η ταχύτητα των κόκκων. Η κατάσταση αυτή ισχύει για μικρές διαμέτρους εστίασης. Σύμφωνα όμως με μελέτες περισσότερος αέρας υπάρχει σε μεγάλες διαμέτρους εστίασης. Ο αέρας αραιώνει το μίγμα και κατά συνέπεια μειώνει την ταχύτητα των κόκκων.

Απ' την άλλη πλευρά, η μικρή διάμετρος εστίασης ενισχύει τα φαινόμενα της πρόσκρουσης, της τριβής και του θρυμματισμού των κόκκων δηλαδή συνεισφέρουν σε μη επαρκή ανάμιξη και επιτάχυνση της δέσμης.

Έτσι λοιπόν υπάρχει μια βέλτιστη τιμή διαμέτρου. Η βέλτιστη τιμή εξαρτάται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τις συνθήκες κατεργασίας. Σύμφωνα με τον Blickwedel [10] υπάρχει μια βέλτιστη αναλογία μεταξύ της διαμέτρου εστίασης και της διαμέτρου του ακροφυσίου.

$$d_{\text{Fopt}} = (3...4) \cdot d_0 \quad (4.23)$$

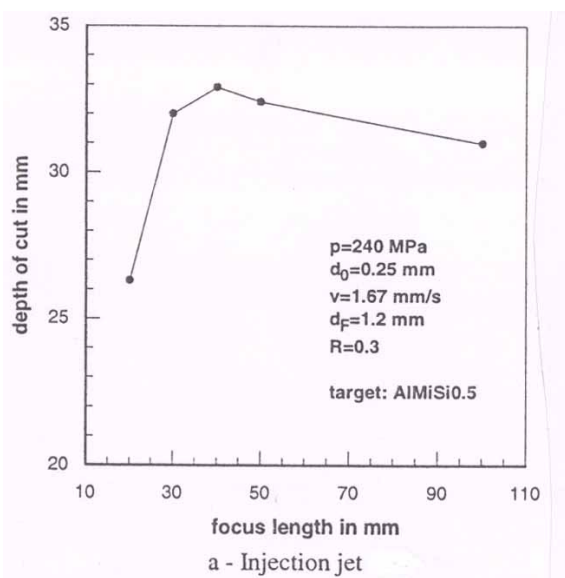
Οι Mazurkiewicz, Fincuan, Ferguson [27] υποθέτουν μια βέλτιστη αναλογία μεταξύ της διαμέτρου των κόκκων και της διαμέτρου εστίασης.

$$d_{\text{Fopt}} = 3 \cdot d_p \quad (4.24)$$

Κατά τη διάρκεια κοπής βράχων, ο Herling [26] παρατήρησε βέλτιστη κοπή σ' αυτή την αναλογία.

Ο Blickwedel μελέτησε τη σχέση μεταξύ της διαμέτρου εστίασης και του ρυθμού ροής μάζας κόκκων. Παρατήρησε βέλτιστη εκμετάλλευση για μικρή διάμετρο εστίασης. Η αναλογία μεταξύ του βάθους κοπής και του ρυθμού ροής λειαντικού παρουσιάζει μέγιστες τιμές σε μικρές διαμέτρους εστίασης.

4.4.2 Επίδραση του μήκους εστίασης



Σχήμα 4.11 Σχέση ανάμεσα στο μήκος εστίασης και το βάθος κοπής.

Παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα, αρχικά, το βάθος κοπής αυξάνει με αύξηση του μήκους εστίασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτείται μια συγκεκριμένη απόσταση για να επιταχυνθούν οι εκχυόμενοι κόκκοι. Πέρα απ' αυτή την επιτάχυνση όμως δεν συμβαίνει καμία περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας των κόκκων γιατί αρχίζει να υπάρχει τριβή εξαιτίας του εκχεόμενου νερού. Η τριβή μειώνει την ταχύτητα των κόκκων γεγονός που μειώνει το βάθος κοπής.

Η βέλτιστη τιμή του μήκους εστίασης εξαρτάται από την πίεση της αντλίας, το μήκος της δέσμης και το ρυθμό ροής των κόκκων πάγου. Γενικά, το βέλτιστο μήκος εστίασης αυξάνεται όταν αυξάνεται η πίεση της αντλίας και το μήκος της δέσμης και μειώνεται η ροή της μάζας των κόκκων. Η επίδραση της πίεσης της αντλίας

επεξηγείται από το γεγονός ότι η υψηλής ταχύτητας δέσμη έχει την ικανότητα να επιταχύνει τους κόκκους, συγκριτικά, σε υψηλότερες ταχύτητες. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μεγαλύτερους σωλήνες εστίασης. Η μείωση του βέλτιστου μήκους εστίασης για υψηλούς ρυθμούς ροής κόκκων είναι αποτέλεσμα της αυξανόμενης αλληλεπίδρασης μεταξύ των τοιχωμάτων στο χώρο εστίασης και των κόκκων.

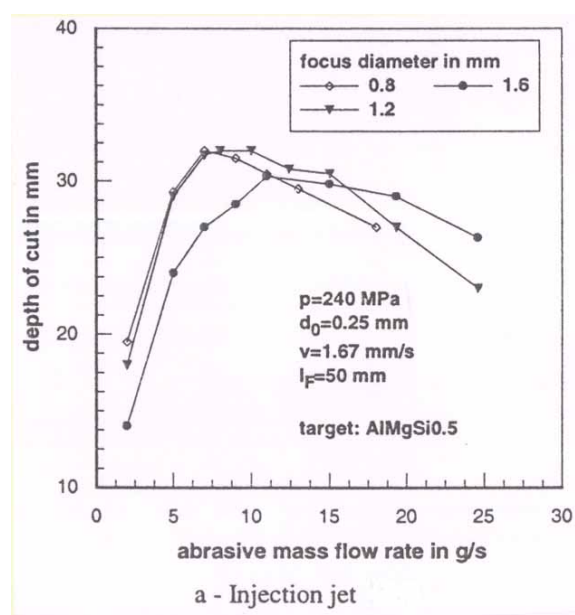
Ο Heblin [26] έδειξε ότι η βέλτιστη απόσταση επιτάχυνσης επηρεάζεται από την πυκνότητα του υλικού των κόκκων, όπως κι από το μήκος τους. Οι Galecki και Summers [28] παρατήρησαν ότι μεγαλύτεροι κόκκοι χρειάζονται μεγαλύτερα μήκη εστίασης, γεγονός που είναι ίδιο με τη σχέση μεταξύ πυκνότητας υλικού κόκκων και απόστασης επιτάχυνσης. Όσο πιο πυκνός και βαρύτες είναι ο κόκκος του πάγου, τόσο μεγαλύτερη απόσταση χρειάζεται για να επιταχυνθεί. Επίσης παρατηρήθηκε ότι το πλεονέκτημα του μεγάλου μήκους εστίασης χάνει την αξία του αν χρησιμοποιήσουμε κόκκους με πολλές γωνίες (σπασίματα) αντί για σφαιρικούς.

Γενικά απ' τα πειράματα που έγιναν σε κατεργασίες προτείνεται η σχέση μεταξύ του μήκους εστίασης και της διαμέτρου εστίασης να είναι η παρακάτω για να έχουμε βέλιστα αποτελέσματα.

$$l_{Fopt} = (25...50) \cdot d_F \quad (4.24)$$

4.5 Επίδραση των παραμέτρων των κόκκων πάγου

4.5.1 Επίδραση του ρυθμού ροής της μάζας των κόκκων πάγου



Σχήμα 4.12 Σχέση ανάμεσα στο ρυθμό ροής κόκκων πάγου και το βάθος κοπής.

Στο σχήμα 4.12 παρατηρούμε τη σχέση μεταξύ του ρυθμού ροής των κόκκων πάγου και του βάθους κοπής. Ο Mombber [21] μελέτησε τη δομή αυτής της σχέσης σε λεπτομέρεια. Με βάση σ' ένα μοντέλο κινητικής κατέληξε:

$$h(\dot{m}_A) = k \cdot \dot{m}_A^m \quad (4.25)$$

Στη σχέση αυτή ο εκθέτης m είναι μια συνάρτηση του ρυθμού ροής κόκκων (βλ. κεφ. 3.5). Για μικρό ρυθμό ροής κόκκων θέτουμε, $m = 1$. Η τιμή του m μειώνεται μέχρι την τιμή $m = 0$ για βέλτιστο ρυθμό ροής και γίνεται $m < 0$ για πολύ υψηλούς ρυθμούς ροής. Από την άποψη της κατανάλωσης κόκκων, οι βέλτιστες τιμές είναι για χαμηλούς ρυθμούς ροής και $m = 1$. Σ' αυτές τις τιμές, κάθε αύξηση της ροής κόκκων οδηγεί σε ανάλογη αύξηση του βάθους κοπής.

Ο ρυθμός ροής μάζας κόκκων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πρώτα απ' όλα, ο ρυθμός ροής μάζας κόκκων προσδιορίζει τον αριθμό των κόκκων πάγου καθώς και τις κινητικές τους ενέργειες. Όσο πιο υψηλός ο ρυθμός, τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός των κόκκων που ενέχονται σε διαδικασίες μίξης και κοπής. Αν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχει επαφή των κόκκων μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της μίξης και της κοπής, τότε κάθε αύξηση του ρυθμού ροής της μάζας των κόκκων οδηγεί σε αύξηση του βάθους κοπής.

Σύμφωνα με το σχήμα 4.12 αυτό φαίνεται ότι ισχύει για χαμηλούς ρυθμούς ροής. Οι ερευνητές Hu, Yang, Geskin [29] βρήκαν γραμμική αύξηση του βάθους κοπής καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόκκων που προσπίπτουν στο τεμάχιο. Για μεγαλύτερες ροές κόκκων, τότε εμφανίζονται κάποιοι μηχανισμοί απόσβεσης, όπως οι προσκρούσεις μεταξύ των κόκκων στο δοχείο ανάμιξης και στην περιοχή επιτάχυνσής τους, όπως και κατά την κοπή. Επίσης, η περιορισμένη κινητική ενέργεια της δέσμης νερού κατανέμεται πάνω σ' ένα μεγάλο αριθμό κόκκων αυτό οδηγεί σε μείωση της κινητικής ενέργειας ενός μεμονωμένου κόκκου. Αυτή η δράση αναιρεί τη θετική επίδραση της υψηλής συχνότητας πρόσκρουσης.

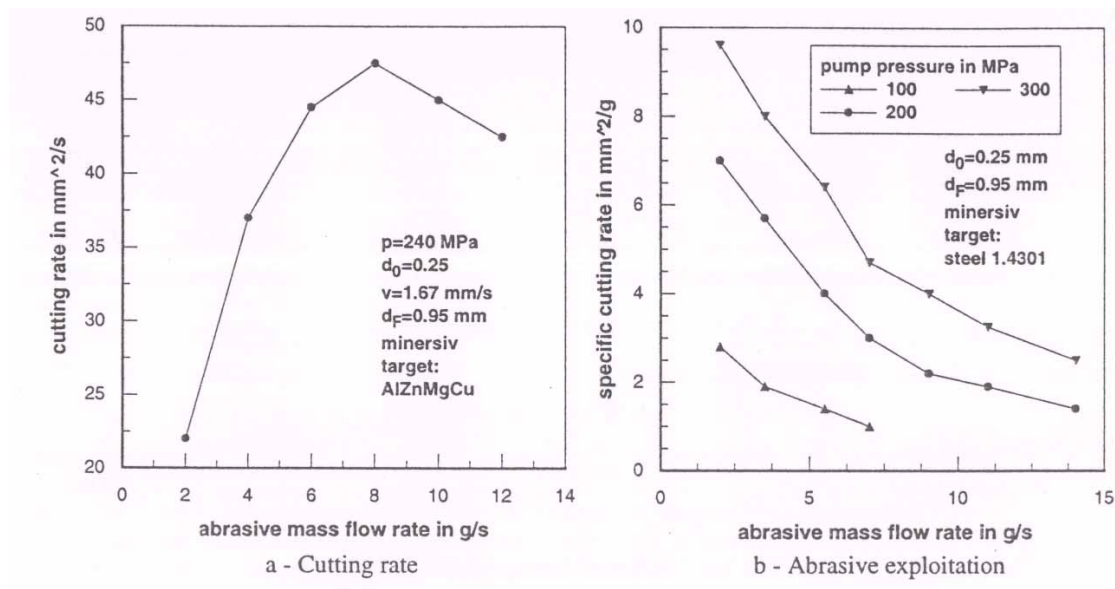
Οι μελετητές Chen και Geskin [30], Miller και Archibald [31] και Himmeldreich και Rieb [32] μελέτησαν τη πτώση της ταχύτητας ενός κόκκου με την αύξηση της ροής της μάζας κόκκων. Αντίθετα οι Neusen, Gores, Labus [33] δεν βρίσκουν καμία επίδραση του ρυθμού ροής μάζας κόκκων στην ταχύτητα των κόκκων. Από μετρήσεις που έκανε ο Konacenic βρέθηκαν και οι δύο απόψεις. Η δεύτερη άποψη ισχύει για πολύ μικρούς ρυθμούς ροής της μάζας κόκκων: ενώ η πρώτη άποψη ισχύει για υψηλούς ρυθμούς. Η σχέση που προκύπτει είναι:

$$v_p(\dot{m}_A) = n_T(\dot{m}_A) \cdot \frac{v_o}{1 + \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_W}} \quad (4.26)$$

Τα πειραματικά αποτελέσματα η παράμετρος ικανότητας, n_T , μειώνεται με αύξηση του ρυθμού ροής κόκκων. Μαθηματικά, πάντως εάν ο ρυθμός ροής μάζας κόκκων είναι υψηλός, κάθε επιπρόσθετη αύξηση δεν συνεισφέρει σε αλλαγή της ταχύτητας των κόκκων.

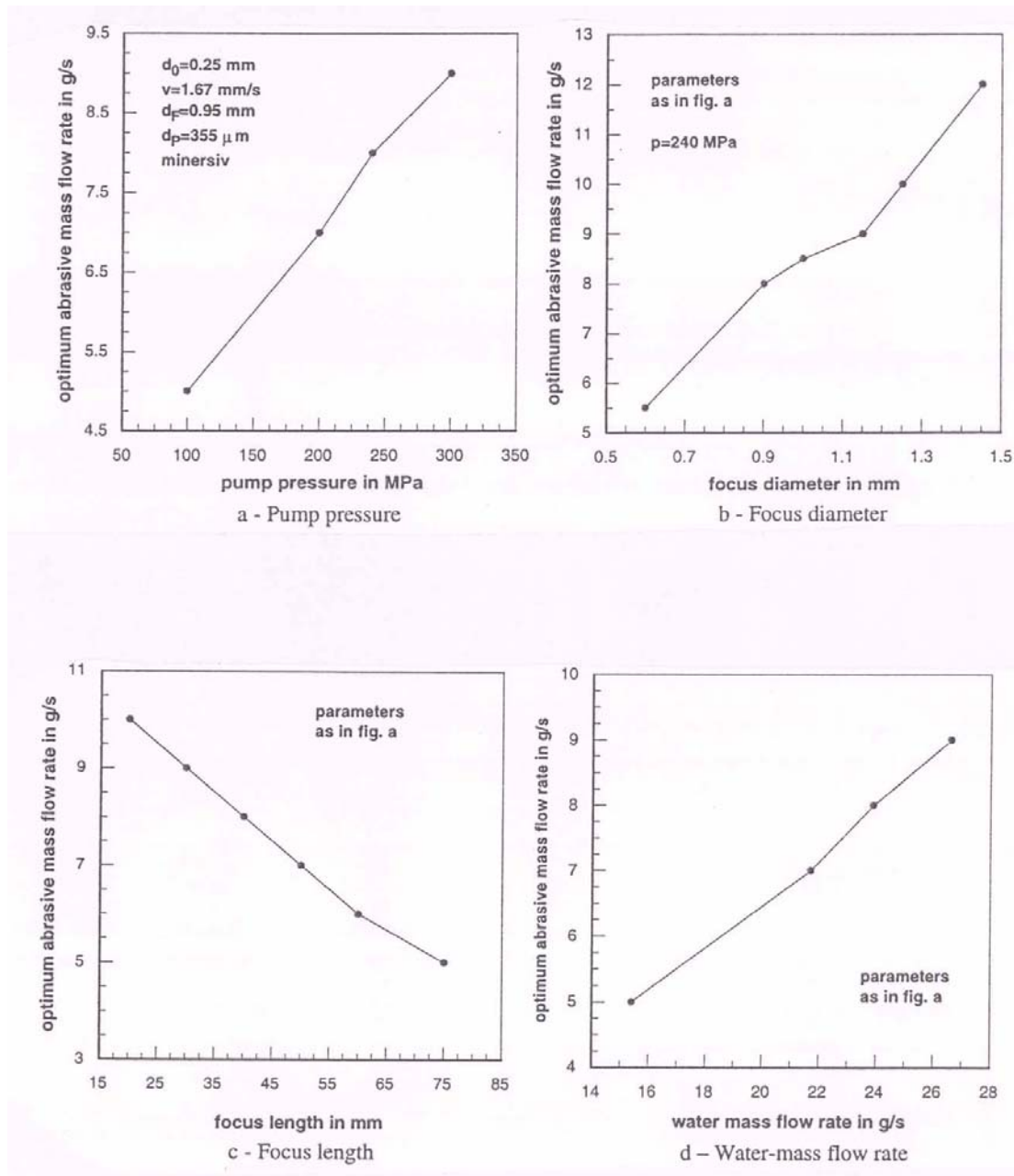
Σύμφωνα με το σχήμα 4.12 υπάρχει ένα maximum σε βέλτιστο ρυθμό ροής. Το βέλτιστο εξαρτάται από το υλικό καθώς και από τις παραμέτρους διαδικασίας, συμπεριλαμβάνοντας την πίεση της αντλίας, τη διάμετρο ακροφυσίου, την οριζόντια μετακίνηση, τη διάμετρο εστίασης, το μήκος εστίασης, τη διάμετρο των κόκκων και το σχήμα των κόκκων.

Σύμφωνα με τον Mombert η θέση του βέλτιστου ρυθμού ροής εξαρτάται από την συμπεριφορά παραμόρφωσης του υλικού του τεμαχίου. Ενώ, τα υλικά με ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης έχουν βέλτιστη τιμή σε υψηλές τιμές ρυθμού ροής κόκκων, ενώ πολύ ψαθυρά υλικά έχουν βέλτιστες τιμές σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς ροής. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην μεγάλη ευαισθησία των ψαθυρών υλικών στην ενέργεια πρόσκρουσης των κόκκων. Αντίθετα, ένα υλικό που αντιδρά με πλαστική παραμόρφωση είναι πολύ ευαίσθητη σ' ένα αριθμό προσκρουόμενων κόκκων (βλ. σχήμα 4.14 στην επόμενη σελίδα).



Σχήμα 4.13 Βελτιστοποίηση του ρυθμού ροής κόκκων πάγου.

Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του ρυθμού ροής της μάζας των κόκκων πάγου και του ρυθμού κοπής. Αυτή η διαπίστωση είναι ιδανική για το βάθος κοπής: παρουσιάζεται maximum σε βέλτιστο ρυθμό ροής. Με βάση την εκμετάλλευση των κόκκων, προτείνονται μικροί ρυθμοί ροής κόκκων πάγου.



Σχήμα 4.14 Παράμετροι που επηρεάζουν το βέλτιστο ρυθμό ροής κόκκων πάγου.

4.5.2 Επίδραση της διαμέτρου των κόκκων πάγου και του βάθους κοπής

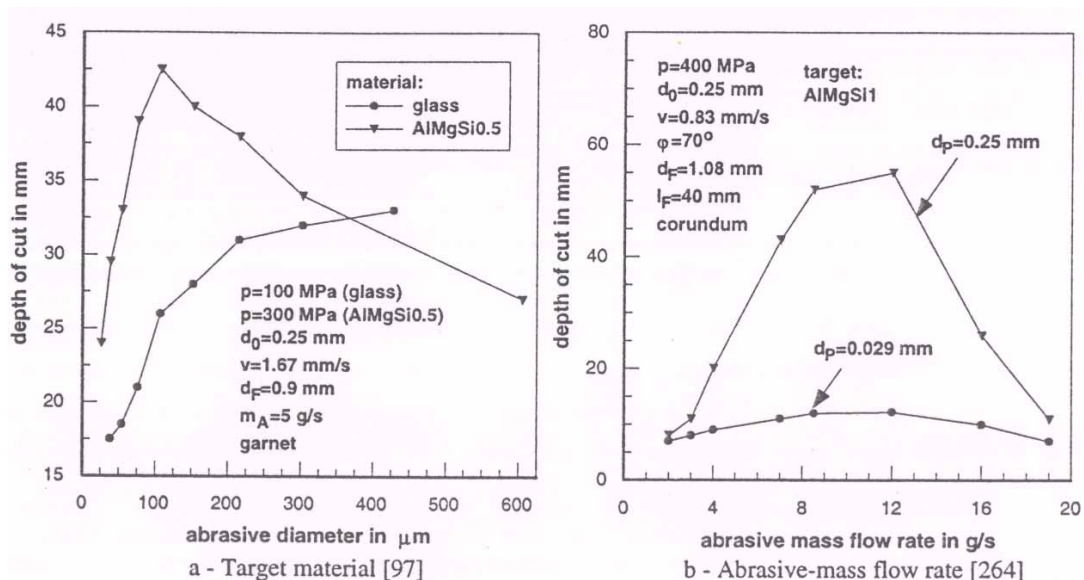
Η σχέση μεταξύ της διαμέτρου των κόκκων πάγου και του βάθους κοπής φαίνεται στο σχήμα 4.15 και μαθηματικά εκφράζεται:

$$h(d_p) = C_{14} \cdot d_p^{C_{15}} \cdot \exp(C_{16} \cdot d_p) \quad (4.27)$$

Στη σχέση αυτή, εμφανίζονται τέσσερα στάδια. Για μικρές διαμέτρους κόκκων, $C_{15} = 1$ και $C_{16} = 0$. Αυτό οδηγεί σε γραμμική σχέση μεταξύ της διαμέτρου των κόκκων και το βάθος κοπής. Η αιτία γι' αυτή τη σχέση είναι η μεγάλη κινητική ενέργεια των μεγάλων κόκκων που εκφράζεται από $E_p \propto dp^3$. Απ' την άλλη πλευρά, ο αριθμός των κόκκων μειώνεται με αύξηση της διαμέτρου τους.

Στο δεύτερο στάδιο, $0 < C_{15} < 1$ και $C_{16} = 0$. Η συνάρτηση φθίνει εξαιτίας της μειωμένης συχνότητας πρόσκρουσης. Η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της κινητικής ενέργειας ενός κόκκου πάγου και του αριθμού των κόκκων που προσκρούουν ξεπερνιέται.

Στο τρίτο στάδιο υπάρχουν βέλτιστες συνθήκες. Εδώ ισχύει $C_{15} = C_{16} = 0$. Σ' αυτό το στάδιο, επιτυγχάνεται το μέγιστο βάθος κοπής $h_{max} = C_{14}$. Η θέση και το πλάτος αυτού του εύρους τιμών εξαρτάται απ' τις ιδιότητες του υλικού καθώς και από τις παραμέτρους της διαδικασίας. Το εύρος τιμών είναι συγκριτικά μεγάλο για ψαθυρά υλικά. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι το εύρος τιμών επηρεάζει την ποιότητα της κοπής χωρίς να επηρεάζει το βάθος κοπής.



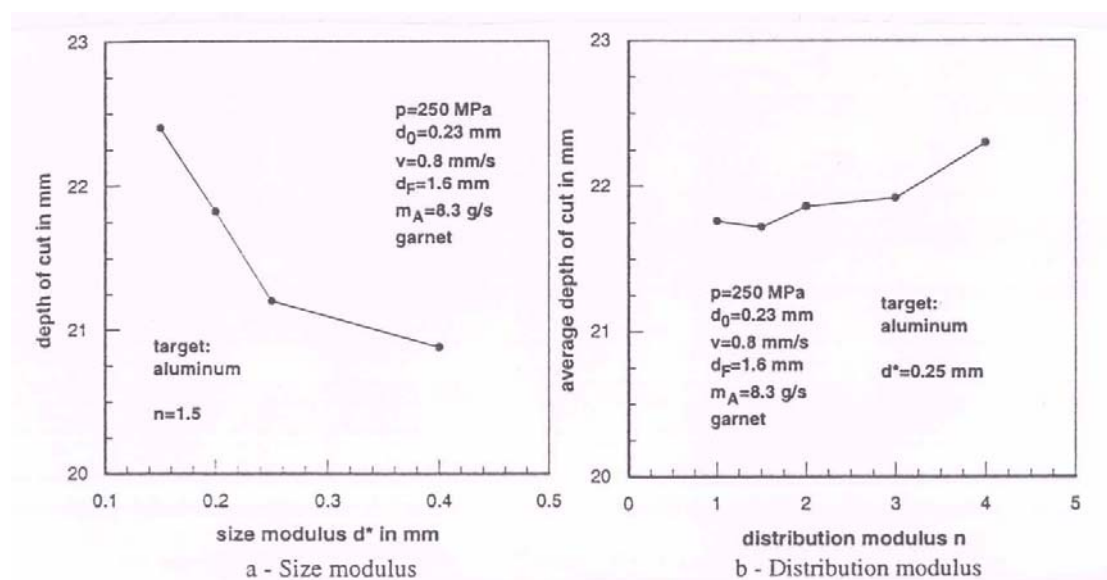
Σχήμα 4.15 Σχέση ανάμεσα στη διάμετρο των κόκκων πάγου και το βάθος κοπής.

Στο τελευταίο στάδιο, το βάθος κοπής φθίνει με αύξηση της διαμέτρου των κόκκων. Αυτό το αποτέλεσμα, οφείλεται στη μειωμένη συχνότητα πρόσκρουσης και στις μειωμένες ταχύτητες των κόκκων.

Η επίδραση της διαμέτρου των κόκκων στην κατεργασία κοπής εξαρτάται από το ρυθμό ροής των κόκκων πάγου. Μικροί κόκκοι δεν είναι ευαίσθητοι σε αλλαγές του ρυθμού ροής· ενώ μεγάλοι κόκκοι οδηγούν στη βέλτιστη περιοχή της κατεργασίας κοπής. Κάποια άλλα στοιχεία που προσδιορίζουν την επίδραση της διαμέτρου των κόκκων στην κατεργασία είναι η μεγαλύτερη πιθανότητα να προσκρούουν οι μεγάλοι κόκκοι και η σχέση μεταξύ του σχήματος των κόκκων και του μεγέθους των κόκκων.

4.5.3 Επίδραση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων πάγου

Οι κόκκοι πάγου που εισέρχονται στη δέσμη χαρακτηρίζεται από μεγάλα εύρη διαφορετικών διαμέτρων. Γενικά, ο μέσος όρος ή το μέσο μέγεθος του κόκκου είναι μόνο μια άποψη της κατανομής των κόκκων. Συχνά, τέτοιες κατανομές χαρακτηρίζονται από δύο ή περισσότερες παραμέτρους.



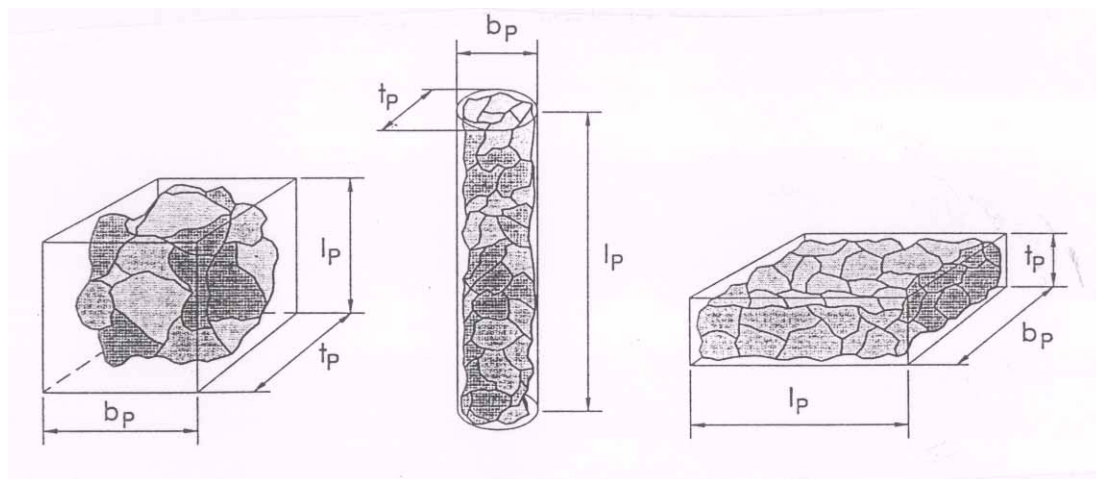
Σχήμα 4.16 Επίδραση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων στο βάθος κοπής

Ο Momber έκανε έρευνα για την επίδραση των παραμέτρων της κατανομής του μεγέθους των κόκκων στην διαδικασία κοπής. Επέλεξε την κατανομή Rosin-Rammler-Sperling (RRSB) και βρήκαν ότι η επίδραση του μεγέθους του ορίου (modulus) είναι πιο σημαντική απ' το modulus της κατανομής. Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζονται αλλαγές στην κατανομή του modulus n , που γεννά αποκλίσεις του

βάθους κοπής μικρότερες από 5%. Αντίθετα, η ομαλότητα της επιφάνειας στον πυθμένα της εγκοπής βελτιώνεται αν διαφοροποιήσουμε τις παραμέτρους της κατανομής του μεγέθους των κόκκων πάγου.

4.5.4 Επίδραση του μεγέθους των κόκκων

Το σχήμα των κόκκων του πάγου χαρακτηρίζεται απ' ορισμένους παράγοντες σχήματος, όπως:



Σχήμα 4.17 Λόγος επιμήκυνσης και λόγος επιπεδότητας για το χαρακτηρισμό του σχήματος των κόκκων πάγου

λόγος επιμήκυνσης: $r_E = \frac{l_p}{b_p}$ (4.28)

λόγος επιπεδότητας: $r_F = \frac{b_p}{t_p}$ (4.29)

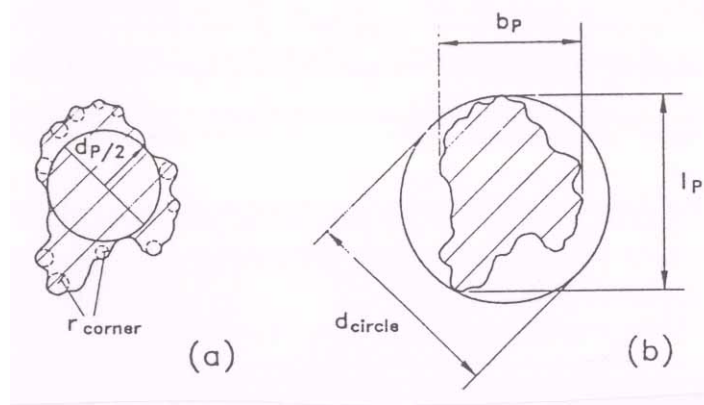
σφαιρικότητα: $S_p = \frac{\sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot b_p \cdot l_p}}{d_{\text{circle}}}$ (4.30)

καμπυλότητα: $S_R = \frac{\sum \left(\frac{2 \cdot r_{\text{corner}}}{d_p} \right)}{N_{\text{corner}}}$ (4.31)

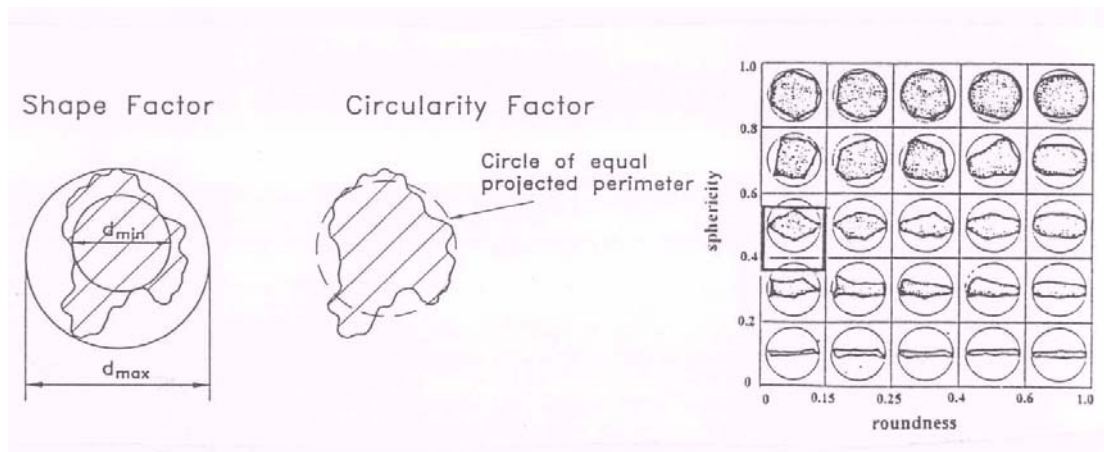
κυκλικότητα: $F_o = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_p}{P^2}$ (4.32)

με $P = P_x + P_y + \sqrt{2} \cdot P_{xy}$

σφαιρικότητα: $F_{\text{shape}} = \frac{d_{\text{min}}}{d_{\text{max}}}$ (4.33)

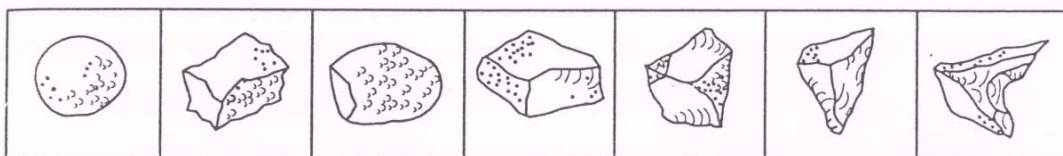


Σχήμα 4.18 Γεωμετρική μορφή των χαρακτηριστικών των κόκκων πάγου.



Σχήμα 4.19 Χαρακτηριστικά σχήματος των κόκκων πάγου.

Στα σχήματα 4.18, 4.19 μπορούμε να δούμε τις δύο τελευταίες παραμέτρους. Για κυκλικούς κόκκους ισχύει: $F_o = 1$ και $F_{shape} = 1$. Στο σχήμα 4.20 μπορούμε να δούμε πιθανά σχήματα των κόκκων.



Σχήμα 4.20 Τυπικά σχήματα κόκκων που μπορούμε να έχουμε στην κατεργασία.

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι οι κόκκοι μπορούν να διαχωριστούν σε σφαιρικούς και με σπασίματα.

Συστηματικές μελέτες έδειξαν ότι το σχήμα των κόκκων επηρεάζει την απομάκρυνση υλικού. Σύμφωνα με τους Bahadur και Badruddin [34] το σχήμα των

κόκκων επηρεάζει τους διαφορετικούς μηχανισμούς αφαίρεσης υλικού όπως η κοπή σε μικροσκοπικό επίπεδο για κόκκους με γωνίες και η κοπή σε μικροσκοπικό επίπεδο για σφαιρικούς κόκκους.

Οι ερευνητικές διέκριναν τις μελέτες τους σε δύο κατηγορίες: για όλκιμα υλικά και για ψαθυρά.

Για όλκιμα υλικά, προτείνουν ότι οι κόκκοι με γωνίες (σπασίματα) βελτιώνουν τη διαδικασία κοπής.

Για ψαθυρά υλικά, προτείνουν ότι σφαιρικοί κόκκοι έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στο βάθος κοπής. Ο Hebling επίσης μελέτησε τη σχέση μεταξύ της επίδρασης του σχήματος του κόκκου και του μήκους εστίασης. Ενώ για μικρά μήκη εστίασης οι κόκκοι με σπασίματα είναι πιο αποτελεσματικοί, για σφαιρικούς κόκκους τα βάθη κοπής είναι καλύτερα με τη χρήση μεγαλύτερου μήκους εστίασης. Η εξήγηση βρίσκεται στο ότι η ικανότητα να επιταχύνονται οι κόκκοι αυξάνεται όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής. Ο συντελεστής τριβής είναι μεγαλύτερος για μη-ομαλούς κόκκους. Γι' αυτό μικρή εστίαση και ακανόνιστα σχήματα κόκκων με μικρή διάμετρο επιταχύνονται πιο καλά απ' τους σφαιρικούς κόκκους. Ωστόσο, κόκκοι με σπασίματα προκαλούν φθορά στα μέρη του εξοπλισμού όπως χοάνες και ακροφύσια.

4.5.5 Επίδραση της σκληρότητας των κόκκων πάγου

Γενικά, μελετάται η σύγκριση της σκληρότητας των κόκκων πάγου και του υλικού του τεμαχίου που κατεργαζόμαστε:

$$\frac{H_M}{H_P} \rightarrow 1 \quad (4.34)$$

Έτσι, οι κατεργασίες είναι πολύ ευαίσθητες σε αλλαγές που σχετίζονται με τη σκληρότητα.

Γενικά για ψαθυρά υλικά, ισχύει το εύρος $1.0 < H_M / H_P < 1.1$. Πέρα απ' αυτά τα εύρη τιμών η πρόοδος της κατεργασίας μειώνεται, γι' αυτό και δεν ενδείκνυται περαιτέρω αύξηση στη σκληρότητα. Επίσης, η σκληρότητα των κόκκων επηρεάζει και τη συμπεριφορά τους ως προς το σπάσιμό τους. Όσο πιο σκληρό είναι ένα υλικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητά του να σπάσει. Γι' αυτό και κατά τη διάρκεια της ανάμιξης και της επιτάχυνσής τους σπάζουν και βοηθούν την πορεία της κατεργασίας σε μικροσκοπικό επίπεδο.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ

5.1 Εναλλακτικές κατεργασίες με χρήση IWJM

Τα μοντέλα όπως παρουσιάστηκαν στα κεφ. 3 και 4 μπορούν να εφαρμοστούν σε εναλλακτικές κατεργασίες. Η προσαρμοστικότητα της κοπής σε κάθε υλικό είναι πολύ σημαντικό προσόν της μεθόδου. Συγκεκριμένα η μέθοδος IWJM μπορεί να εφαρμοστεί σε:

- φρεζάρισμα
- τορνίρισμα
- διαίριση
- φινίρισμα

Εμείς στο κεφ. αυτό θα δούμε την εφαρμογή της IWJM σε φρεζάρισμα και θα προσαρμόσουμε ορισμένα μοντέλα εφαρμοσμένα σε AWJM και κατεργασία IWJ.

5.2 Παράμετροι που βελτιστοποιούνται στο φρεζάρισμα IWJ

Αντίθετα με την κοπή, στο φρεζάρισμα οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και το βάθος κοπής. Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού δείχνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, και το βάθος κοπής δείχνει τη γεωμετρική μορφή των δημιουργούμενων κοιλοτήτων. Επίσης, σε σύγκριση με την κοπή, το βάθος κοπής είναι μικρότερο, έτσι καταστάσεις που οδηγούν σε απώλεια ενέργειας, όπως η απόσβεση, παίζουν μικρότερο ρόλο.

Αναλυτικότερα, ας πάρουμε αυτές τις δύο παραμέτρους κι ας δούμε ποιοι παράγοντες τις επηρεάζουν.

5.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό αφαίρεσης υλικού

- **Πίεση της αντλίας.** Γενικά, παρατηρείται αύξηση γραμμική του ρυθμού αφαίρεσης υλικού με αύξηση της πίεσης της αντλίας. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί και ένα κατώφλιο (P_{thr}) όπως και στην κοπή.

- **Διάμετρος ακροφυσίου.** Η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου αυξάνει και τον όγκο του υλικού που απομακρύνεται. Ωστόσο αυτό παύει να ισχύει από μια συγκεκριμένη διάμετρο (d_0). Γίνεται μελέτη για το όριο της διαμέτρου όπως επίσης και για το κατώφλιο (d_{0thr}) ενώ αξίζει να θυμίσουμε ότι για AWJM οι τιμές ήταν περίπου $d_0 = 0.3 \text{ mm}$ και $d_{0thr} = 0.1 \text{ mm}$.

- **Ρυθμός οριζόντιας μετακίνησης ακροφυσίου.** Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού παραμένει σχεδόν σταθερός όταν ξεπεραστεί μια συγκεκριμένη τιμή ρυθμού οριζόντιας μετακίνησης. Όσο μικρότερο είναι το μήκος της δέσμης, τόσο μεγαλύτερη είναι η κρίσιμη τιμή του ρυθμού οριζόντιας μετακίνησης. Για δυσκολοκατεργασία πυρίμαχα κεραμικά, δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση στο ρυθμό απομάκρυνσης υλικού, ενώ στα μαλακότερα κεραμικά η αύξηση του ενός οδηγεί σε γραμμική αύξηση του άλλου. Ωστόσο, στο φρεζάρισμα με πολλά πάσσα μπορεί να παρατηρηθεί μια μέγιστη τιμή στο ρυθμό απομάκρυνσης του υλικού, όπως και στο AWJM.

- **Μήκος δέσμης.** Γενικά, μπορεί να παρατηρηθεί ένα βέλτιστο μήκος δέσμης για να επιτύχουμε μέγιστους ρυθμούς αφαίρεσης υλικού. Αυτό άλλοι ερευνητές το συσχετίζουν με τη διάμετρο εστίασης που χρησιμοποιείται κι άλλοι με το ρυθμό οριζόντιας απομάκρυνσης.

- **Γωνία πρόσπτωσης.** Η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στο ρυθμό απομάκρυνσης υλικού είναι μια πολυπαραγοντική μελέτη. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι ισχύει στην AWJM ότι δηλαδή για όλκιμα υλικά η μέγιστη απομάκρυνση παίρνει μέγιστες τιμές στις γωνίες μεταξύ $\varphi_{opt} = 40^\circ$ και $\varphi_{opt} = 60^\circ$ ενώ για κεραμικά υλικά είναι περίπου $\varphi_{opt} = 90^\circ$. Ωστόσο εξαρτάται από το είδος του υλικού που κατεργαζόμαστε και από την ίδια την κατεργασία.

- **Διάμετρος εστίασης.** Ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της διαμέτρου εστίασης μέχρι να επιτευχθεί μια μέγιστη τιμή ρυθμού και στη συνέχεια φθίνει.

- **Ρυθμός ροής μάζας κόκκων.** Στην περιοχή των μικρών ρυθμών ροής μάζας κόκκων, ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ροή μάζας κόκκων πάγου. Όμως, σε συνάρτηση με την πίεση της αντλίας, υπάρχει βέλτιστη τιμή της ροής της μάζας κόκκων πάγου για φρεζάρισμα.

5.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το βάθος κοπής

Το βάθος κοπής (και συγκεκριμένα η ανοχή του βάθους) σε συνδυασμό με την τραχύτητα της κατώτερης επιφάνειας (του πυθμένα) της κοιλότητας, δίνουν την ποιότητα του φρεζαρίσματος. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι:

- **Πίεση της αντλίας.** Η ανοχή στο βάθος φρεζαρίσματος αυξάνει γραμμικά με την αύξηση της πίεσης της αντλίας.

- **Ρυθμός οριζόντιας απομάκρυνσης.** Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός οριζόντιας απομάκρυνσης του ακροφυσίου το προφίλ του πυθμένα της κοιλότητας, γίνεται περισσότερο ομοιόμορφο. Όταν έχουμε φρεζάρισμα με πολλά περάσματα (πάσσα),

σε υψηλούς ρυθμούς οριζόντιας απομάκρυνσης, όσο πιο πολλά είναι τα περάσματα τόσο πιο ομοιόμορφος είναι ο πυθμένας. Επίσης, στο φρεζάρισμα με πολλά περάσματα, το βήμα επηρεάζει το τοπογραφικό της επιφάνειας. Μείωση στο βήμα, βελτιώνει την ανοχή στο βάθος φρεζαρίσματος.

- **Γωνία πρόσπτωσης δέσμης.** Η τραχύτητα του πυθμένα βελτιώνεται όταν η γωνία πρόσπτωσης παρουσιάζει κλίση η οποία μελετάται ανάλογα με την εφαρμογή.

- **Ροή μάζας κόκκων πάγου.** Γενικά, η τραχύτητα της επιφάνειας βελτιώνεται με την αύξηση της ροής μάζας κόκκων πάγου. Όμως εδώ περιοριστικό ρόλο παίζει η δυναμική της αντλίας.

- **Μέγεθος κόκκων πάγου.** Η ομοιομορφία στο βάθος βελτιώνεται σημαντικά αν η αφαίρεση υλικού γίνεται με το καλύτερο δυνατόν μέγεθος κόκκου πάγου. Γενικά ανάλογα με το υλικό του τεμαχίου, πρέπει να χρησιμοποιείται ομοιόμορφο μέγεθος για το αρχικό πέρασμα και για το φινιρίσμα γιατί έχει αποδειχθεί από την AWJM ότι βελτιώνει την τελική επιφάνεια σε ανοχή βάθους.

5.3 Μοντελοποίηση φρεζαρίσματος με IWJ

Από τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για φρεζαρίσματα με AWJM εμείς θα χρησιμοποιήσουμε και θα προσαρμόσουμε σε IWJM μόνο δύο: το γενικό μοντέλο και το αριθμητικό μοντέλο. Βασικό πρόβλημα στο φρεζάρισμα είναι η γεωμετρική μορφή των κοιλοτήτων που θα δημιουργηθούν.

5.3.1 Γενικό μοντέλο φρεζαρίσματος

Χρησιμοποιούμε σαν βάση τις μελέτες των Hashish [35], Laurinat [36], Freist [37].

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η επίδραση της εγκάρσιας απόστασης από την κοπή -e- στη γεωμετρία της κοιλότητας για φρεζάρισμα σε πολλαπλά βήματα.

Για $e = 0$ το βάθος της αρχικής κοιλότητας αυξάνει

$$h = n_p \cdot h_0 \quad (5.1)$$

όπου n_p = αριθμός περασμάτων πάνω από την εγκοπή

h_0 = βάθος αρχικής κοιλότητας (ενός μόνο περάσματος)

Το πλάτος της κορυφής της εγκοπής δεν επηρεάζεται.

Για $0 < e < \frac{bt}{2}$ και $n_p = \frac{bt}{e}$, ισχύει

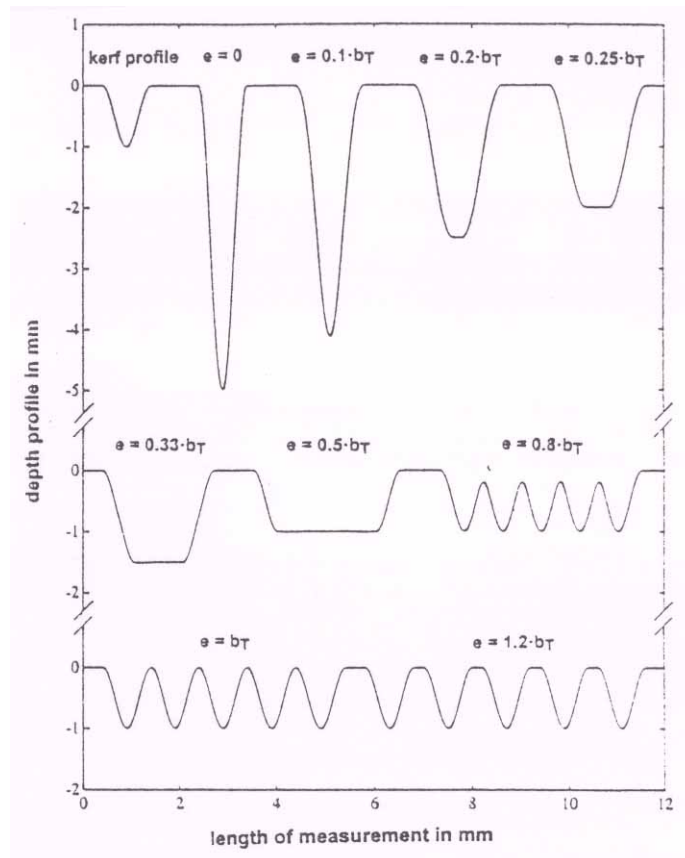
όπου bt = πλάτος κορυφής εγκοπής.

$$h = \frac{h_0 b_T}{2e} \quad (5.2)$$

Για $e > \frac{b_T}{2}$, ισχύει

$$h = h_0 \quad (5.3)$$

Για τα παραπάνω ισχύει ότι ο η_p είναι συγκεκριμένος αριθμός.



Σχήμα 5.1 Επίδραση της εγκάρσιας απόστασης στη γεωμετρία της κοιλότητας.

Για κεραμικά υλικά η σχέση που δίνει το βάθος κοπής μ' ένα πέρασμα είναι συνημιτονοειδής συνάρτηση:

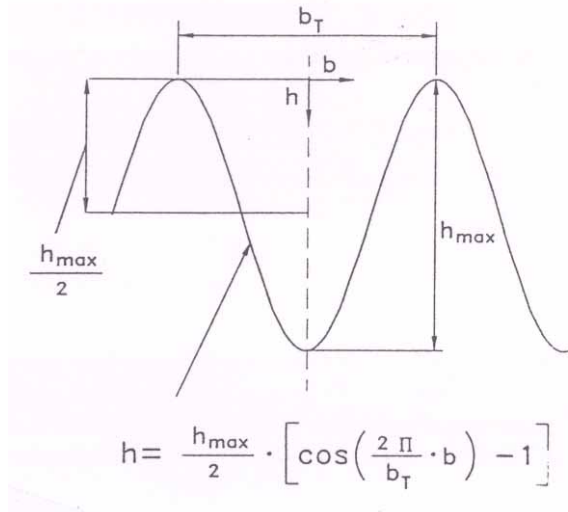
$$h(b) = \frac{h_{max}}{2} \cdot (\cos b - 1) \quad (5.4 a)$$

$$\text{για } b_T = 2 \cdot \pi \quad (5.4 b)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για μεγάλες τιμές του λόγου $\frac{b_T}{h}$ και για προφίλ με μικρή τραχύτητα επιφάνειας.

Η παραπάνω σχέση τροποποιήθηκε απ' τον Laurinat [36] σε:

$$h = \frac{h_{\max}}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{b_T} \cdot b\right) - 1 \right] \quad (5.5)$$



Σχήμα 5.2 Προσέγγιση της γεωμετρίας της κοιλότητας για IWJM.

Ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού δίνεται απ' τη σχέση:

$$\dot{V}_M = A_M \cdot \int_{-b/2}^{b/2} h(x) dx \quad (5.6 a)$$

κι αν λύσουμε το ολοκλήρωμα

$$\dot{V}_M = h \cdot b_T \cdot v \quad (5.6 b)$$

5.3.2 Αριθμητικό μοντέλο φρεζαρίσματος

Εδώ χρησιμοποιούμε το μοντέλο των Yong και Konacenic [38] έτσι όπως παρουσιάστηκε στο κεφ. 3.6.2.

Περίληπτικά αναφέρουμε ότι οι ερευνητές αυτοί χωρίζουν το τεμάχιο που πρόκειται να κατεργαστούμε μ' ένα δικτύωμα. Κάθε κελί του δικτυώματος ονομάζεται «κελί μνήμης», όπου καταγράφονται διάφορες πληροφορίες για να εκτιμηθεί το βάθος κοπής. Η μελέτη του μοντέλου γίνεται με τη βοήθεια του υπολογισμού της κινητικής ενέργειας σε κάθε κελί.

Το βάθος κοπής είναι συνάρτηση της ταχύτητας των κόκκων πάγου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και των πληροφοριών που καταγράφηκαν όπως αντίσταση υλικού του τεμαχίου, σκληρότητα κόκκου πάγου κ.λ.π.

$$h = f(c_1, c_2, \dots, c_j) \cdot v_{P_z}^k (h) \geq 0 \quad (5.7)$$

$$f(c_1, c_2, \dots, c_j) > 0$$

όπου K: σταθερά αφαίρεσης όγκου υλικού

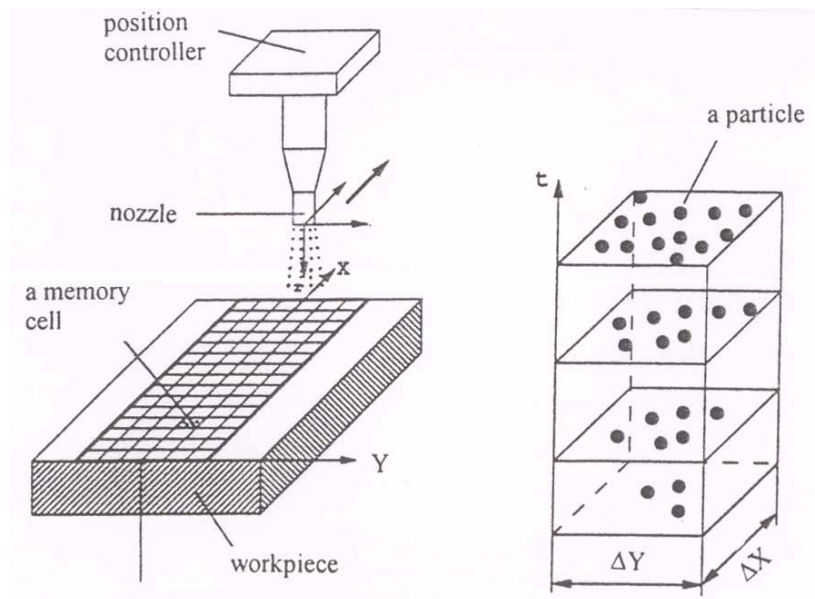
$c_j = c_j(t, x_j, y_j, z_j)$ ($j = 1, \dots$) συνάρτηση κατάστασης που περιγράφει είτε αντίσταση υλικού είτε σκληρότητα πάγου, είτε κάθε άλλη παράμετρος για συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Το βάθος κοπής που επιτυγχάνεται μετά πάροδο χρόνου Δt είναι το:

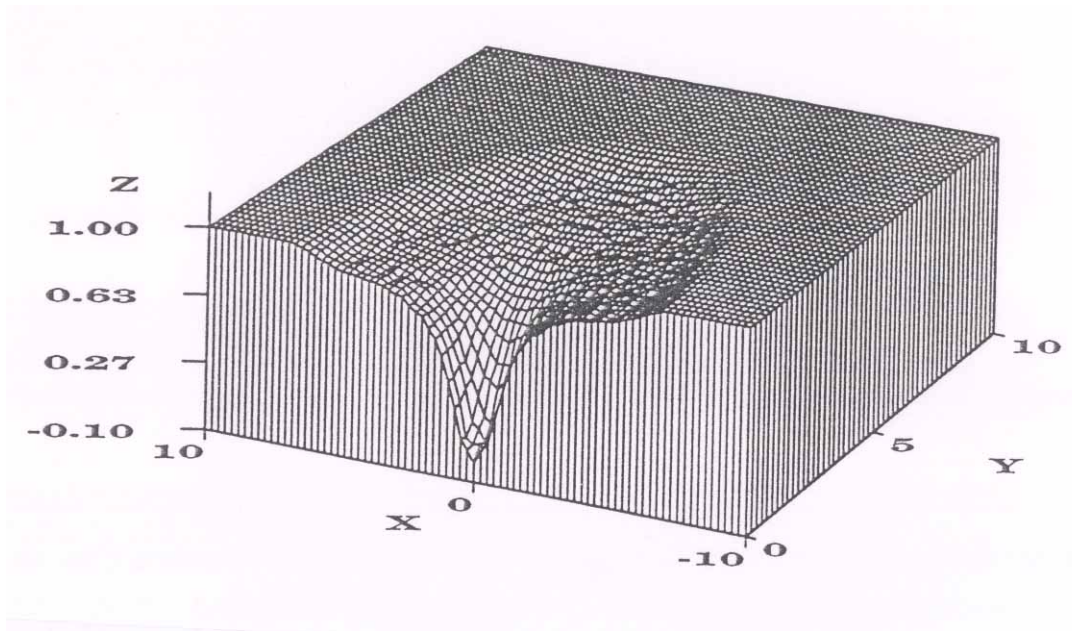
$$\Delta h = \frac{v_{P_z}^k \sum_{i=1}^j \left[\frac{\partial f}{\partial c_i} \Delta c_i \right]}{1 - k \cdot f \cdot v_{P_z}^{k-1} \cdot \frac{\partial v_{P_z}}{\partial h}}$$

με $\frac{\partial v_{P_z}}{\partial h}$ την απώλεια ταχύτητας του κόκκου πάγου.

Συνολικά αθροίζονται τα Δh και δίνουν το βάθος κοπής που επιτεύχθηκε. Παρακάτω στο σχήμα 5.3 φαίνεται μια διαδικασία προσομοίωσης της κατεργασίας για κάθε κελί μνήμης ενώ στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται μια άποψη κωνοειδούς κοιλότητας που επιτυγχάνεται από αλγόριθμο προσομοίωσης τριών διαστάσεων σύμφωνα με το μοντέλο.



Σχήμα 5.3 Προσομοίωση κατεργασίας με δίκτυο κελιών – μνήμης.



Σχήμα 5.4 Κοιλότητα σε σχήμα κώνου για 3D – προσομοίωση.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ IWJM

Η μέθοδος IWJM είναι μια εξελισσόμενη μέθοδος κατεργασίας με πολλές προοπτικές εφαρμογής. Παρουσιάζει, επίσης εξαιρετικό ενδιαφέρον αφού προσφέρει νέα πεδία έρευνας και βελτιστοποίησης. Η μοντελοποίηση, όπως φάνηκε και στην παρούσα εργασία, αποδεικνύει την δυνατότητα ελέγχου των παραμέτρων της διαδικασίας με σκοπό τη βελτίωση της αποτελεσματικότητάς της.

Δεν έχει, ακόμη, κατακτήσει την αγορά στον τομέα των μηχανουργικών κατεργασιών, γιατί βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης και της βελτιστοποίησης. Όμως η αγορά είναι ευαισθητοποιημένη στις εναλλακτικές μορφές κατεργασίας και το ιδιωτικό ενδιαφέρον πολλές φορές χρηματοδοτεί την έρευνα, εξειδικεύοντας τη λειτουργία της μεθόδου στις ιδιαιτερότητες της δικής τους παραγωγικής διαδικασίας. Η κατεργασία με δέσμη νερού-πάγου όπως και αέρα-πάγου εντάσσεται στην παραγωγική διαδικασία όπως κάθε γνωστή κατεργασία.

Η απλότητα της μεθόδου και η πλήρης απουσία περιβαλλοντολογικών επιμολύνσεων είναι απ' τα κυριότερα πλεονεκτήματά της.

Η χρήση λειαντικών μέσων, στη μέθοδο AWJM, έχει αρκετά μεγάλη κατανάλωση λειαντικού υλικού που σε κατεργασίες όπως το φρεζάρισμα, κάνει αυτή την κατανάλωση πολύ μεγαλύτερη. Δεν υπάρχει επίσης, πάντοτε η δυνατότητα ανακύκλωσής τους αφού καταστρέφονται κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσής τους στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Στη μέθοδο IWJM η ανακύκλωση του πάγου είναι δεδομένη αφήνοντας τα υπολείμματα υλικού του τεμαχίου καθαρά από προσμίξεις για να ανακυκλωθούν.

Παρουσιάζει χαμηλότερους ρυθμούς παραγωγής σε σχέση με την AWJM αλλά το μειονέκτημα αυτό υπερκαλύπτεται απ' την φιλικότητα του περιβάλλοντος της κατεργασίας της μεθόδου IWJM. Δεν αμφισβητείται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αφού αποδεδειγμένα μπορεί να κατεργαστεί σκληρά υλικά.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον, για τη βελτίωση της εμπορικής ανταγωνιστικότητας της μεθόδου, είναι ζωηρό. Μελετώνται τα υποσυστήματα των συσκευών IWJ για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της μεθόδου και εξάλειψη των προβλημάτων που υπάρχουν. Τέτοια θέματα είναι τα οποία επιδέχονται περαιτέρω μελέτης είναι:

- Παρατηρήθηκε μικρότερος ρυθμός απομάκρυνσης υλικού απ' τον αναμενόμενο θεωρητικά. Μετρήθηκαν οι κόκκοι πάγου στη δέσμη και διαπιστώθηκε ότι κάποιοι έλιωναν στο δοχείο ανάμιξης μέσα στη δέσμη νερού. Εξετάζεται η

αποφυγή της καταστροφής των κόκκων μέσω της εξασφάλισης κατάλληλων συνθηκών ελέγχου της θερμοκρασίας.

- Η διαμόρφωση και ο έλεγχος των ιδιοτήτων των σταγόνων νερού που ψύχονται σε κόκκους πάγου. Εδώ εξετάζεται το σύστημα ψεκασμού που δημιουργεί τις σταγόνες νερού, το πνευματικό του σύστημα και η απόδοσή του. Εξασφάλιση του ελέγχου του μεγέθους και του σχήματος των σταγόνων νερού, όπως επίσης και της συχνότητας παραγωγής τους. δυνατότητα να καταγράφονται οι φάσεις διαμόρφωσης των σταγόνων και μελέτη της κατανομής του μεγέθους τους με σύγχρονες διατάξεις όπως υψηλής ταχύτητας καταγραφή σε βίντεο, laser anemometer κ.λ.π.

- Σχεδιασμό και έλεγχος της διαμόρφωσης κόκκων πάγου. Αυτή η διαδικασία εμπεριέχει σχεδιασμό του συστήματος του εναλλάκτη θερμότητας για μείωση των διαστάσεών του, μελέτη των υλικών του κ.λ.π., επίσης και μελέτη της χρήσης πρόσθετων υλικών στο νερό για να βελτιωθεί το μέγεθος και η σκληρότητα. Μοντελοποίηση της διαδικασίας διαμόρφωσης των κόκκων και κατανομής του μεγέθους τους, δυνατότητα καταγραφής της διαδικασίας διαμόρφωσης των κόκκων με σύγχρονες διατάξεις.

- Σχεδιασμός των συστημάτων των εναλλακτών θερμότητας υψηλής και χαμηλής πίεσης νερού.

- Σχεδιασμός του συστήματος διοχέτευσης των κόκκων πάγου. Ελέγχονται τα υλικά για σωλήνες και οι διαστάσεις τους, όπως επίσης υπολογίζεται η μόνωση που παρέχουν. Ελέγχεται το μέγεθος των κόκκων και η θερμοκρασία τους έτσι ώστε να εξασφαλιστεί να μην λιώσουν ή χάσουν το σχήμα τους. Επίσης μελετάται η διοχέτευση κρύου ρεύματος αέρα.

- Μελετάται η διαδικασία ανάμιξης των κόκκων και του ρεύματος νερού. Μοντελοποίηση και έλεγχος με σύγχρονα μέσα της θερμοκρασίας των κόκκων και του σχήματός τους κατά την έξοδο απ' το σωλήνα ανάμιξης.

- Μελέτη της διαδικασίας της κατεργασίας, δηλαδή : μελέτη και καταγραφή της πορείας των κόκκων και της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, φθορά των σωλήνων και του ακροφυσίου, καταγραφή μεταβολής θερμοκρασίας στην επιφάνεια κοπής, βελτιστοποίηση παραμέτρων κοπής, βελτιστοποίηση και πρόβλεψη διαδικασίας κοπής, μελέτη γωνίας κοπής κ.α.

Τα θέματα για περαιτέρω έρευνα αυξάνονται ακόμα περισσότερο ανάλογα με την εφαρμογή της κατεργασίας, τις ιδιαιτερότητες του κατεργαζόμενου τεμαχίου και με την θέση της στην παραγωγική διαδικασία. Σήμερα αναπτύσσεται πληθώρα expert systems για την τεχνική IWJM όπως ακριβώς είχαν αναπτυχθεί και για την AWJM.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μελέτη σκοπιμότητας Π.Ο.Κ. «WATER-JET MACHINING», ΠΕΝΕΔ 2001
2. G. Spur, E. Uhlmann, F. Elbing, 1999, «Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application», Elsevier Science S.A., Wear 233-235, pp. 402-411.
3. Μελέτη σκοπιμότητας Swinburne U.T.
4. S. Stratford, «Dry ice blasting for paint stripping and surface preparation».
5. D. Shishkin, 2002, «Development of Ice jet – based machining technology, Dr. Tesis, New Jersey Institute of Technology. (<http://www.iswjt/shishkin1.html>).
6. A. Momber, R. Kovacevic, 1998, «Principles of Abrasive Water Jet Machining», Springer, London.
7. M. Hashish, 1987, «An improved model for erosion by solid particle impact, In: Field J E, Dear J P (eds) 1987 Proc. 7th Int. Conf. Erosion by Liquid and solid Impact, Cavendish Lab. Cambridge, pp. 66.1-66.9.
8. I. Finnie, 1958, «The mechanism of erosion of ductile metals. In: Haythornthwaite R M, et al. (eds) 1958 Proc. 3rd U.S. Nat. Congr. Appl. Mech. ASME, New York, pp. 527-532.
9. M. Hashish, 1988, «Visualization of the abrasive waterjet cutting process». Exp. Mechan. 28: 159-169.
10. H. Blichwedel, 1990, «Erzeugung and Wirkung von Hochdruck – Abvasivstählen» VDI, Fortschritt – Berichte, Reihe 2, Nr, 206.
11. J.G.A. Bitter, 1963, A study of erosion phenomena, part I, Waer 6: 5-21, part II. Wear 6: 169-190.
12. M. Hashish, 1987, «Prediction of depth of cut in abrasive waterjet (AWJ) machining, MD-vol. 3: 65-82.
13. J. Zeng, T.J. Kim, R.J. Wallace, 1992, «Quantitative evaluation of machinability in abrasive waterjet machining», PED-vol. 58: 169-179.
14. S. P. Raju, M. Ramulu, 1994, «Predicting hydro-abrasive wear during abrasive waterjet cutting – part 1: a mechanistic formulation and its solution. PED-vol. 68-1: 339-351.
15. H. Oweinah, 1989, «Leistungssteigerung des Hochdruck-wasserstrahlschneidens durch Zugabe von Zusatzstoffen», PhD thesis, TU Darmstadt, Darmstadt.
16. E. Capello, R. Groppetti, 1993, «On a simplified model for hydro-abrasive jet machining prediction, control and optimization». In: Hashish M (ed) 1993 Proc. 7th Amer. Water Jet Conf., Vol. 1 Water Jet Techn. Ass., St. Louis, pp. 157-174.

17. A. W. Momber, R. Kovacevic, 1997, «Influence of stress-strain behaviour of quasi-brittle materials on their machinability by abrasive water jets» in preparation.
18. S. Lihoshi, K. Nakao, K. Torii, et al, 1986, «Preliminary study on abrasive waterjet assist roadheader» In: Saunders D (ed) 1986 Proc. 8th Int. Symp. Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Engng., Cranfield, pp. 71-77.
19. Y. Chung, E.S.Geskin, P. Singh, 1992, «Prediction of the geometry of the Kerf created in the course of abrasive waterjet machining of ductile materials» In: Lichtarowicz A (ed), 1992, Jet Cutting Technol., Kluwer Acad. Press., Dordrecht, pp. 525-541.
20. S. Matsui, H. Matsumura, Y. Ikemoto, et al.,1991, «Prediction equations for depth of cut made by abrasive water jet», In: Labus T J (ed), 1991, Proc. 6th Amer. Water Jet Conf., WJTA, St. Louis, pp. 31-41.
21. A.W. Momber, 1995, «A generalized abrasive water jet cutting model», In: Labus T J (ed), 1995, 8th Amer. Water Jet Conf., vol. 1, Water Jet Techn. Ass., St. Louis, pp. 359-371.
22. M. Corcoran, M. Mazurkiewicz, P. Karlic, 1988, «Computer simulation of an abrasive waterjet cutting process». In: Woods P A (ed), 1988, Proc. 9th Int. Symp. Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Engng., Cranfield, pp. 49-59.
23. M. Mazurkiewicz, 1989, «Material removal by hydro-abrasive high pressure jet mechanism study», SEM TP M 589-811, pp. 1-15.
24. Z. Yong, R. Kovacevic, 1996, «Modeling of 3D abrasive waterjet machining, part I+II, In: Gee C (ed), 1996, Jetting Technol., Mechan. Engrs. Publ., London, pp. 73-89.
25. A. W Momber, R. Kovacevic, 1994, «Fundamental investigations on concrete wear by high relelocity water flow», Wear 177: 55-62.
26. M. Hebling, 1988, «Grundlagenuntersuchungen über das Schneiden von Gestein mit abrasiven Höchstdruckwasserstrahlen», PhD thesis, RWTH Aachen.
27. M. Mazurkiewicz, L. Fincuan, R. Ferguson, 1988, «Investigation of abrasive cutting head internal parameters», In: Woods P A (ed), 1988, Proc. 9th Int. Symp. Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Engng., Cranfield, pp. 75-84.
28. G. Galeski, D A Summers, 1992, «Steel shot entrained ultra high pressure waterjet for cutting and drilling hard rocks», In: Lichtarowicz A (ed), 1992, Jet Cutting Technol., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, pp. 371-388.
29. F. Hu, Y. Yang, E.S. Geskin, et al., 1991, «Characterization of material removal in the course of abrasive waterjet machining». In: Labus T J (ed), 1991, Proc. 6th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn., Ass., St. Louis, pp. 17-29.

30. W. L. Chen, E. S. Geskin, 1991, «Measurements of the velocity of abrasive waterjet by the use of Laser Transit Anemometer» In: Saunders D 9ed), 1991, Jet Cutting Technol., Elsevier. Sci. Publ., London, pp. 23-36.
31. G. B. Wallis, 1969, One – Dimensional Two – Phase Flowp Mc Graw – Hill, New York.
32. U. Himmelreich, W Reib, 1991, «Laser – Velicometry investigations of the flow in abrasive water jets with varying cutting head geometry», In: Labus T J (ed), 1991, Proc. 6th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn., Ass., St. Louis, pp. 355-369.
33. K. F. Neusen, T J Gores, T J Labus, 1992, «Measurement of particle and drop velocities in a mixed abrasive waterjet using a forward – scatter LDV system», In: Lichtarowicz A (ed), 1992, Jet Cutting Technol., Kluwer Acad. Publ., ordrecht, pp. 63-74.
34. S. Bhahadur, R. Badruddin, 1990, «Erodent particle characteristics and the effect of particle size and shape on erosion», Wear 158: 189-208.
35. M. Hashish, 1986, «Milling with abrasive – waterjets: a preliminary investigation», In: Hood M., Dornfeld (eds), 1986, Proc. 4th U S Water Jet Conf., ASME, N. York, pp. 1-10.
36. A. Laurinat, 1995, «Abtragen mit Wassen abrasivinjektor-strahlen», VDI – Fortschrittberichte, Reihe 2, Nr. 327.
37. B. Freist, H. Haferkamp, A. Laurinat, et al., 1989, «Abrasive jet machining of ceramic products. In: Vijay M M, and Savanick G A (eds), 1989, Proc. 5th Amer. Water Jet Conf., ed., Water Jet Techn. Ass., St. Louis, pp. 191-204.
38. Z. Yong, R. Kovacevic, 1997 «3D-simulation of macro and micro characteristics for AWJ machining». In: Proc. 9th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn., Ass., St. Louis, in print.
39. E.S. Geskin, D. Shishkin, K. Barets, 2002, «Application of ice particles for precision cleaning of sensitive surface», Laboratory of WaterJet Technology, ME Department, New Jersey Institute of Technology, (<http://www.njit.edu/old/NCE/ice>).