



Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Ανασκόπηση της τεχνολογίας Ψυχρού Ψεκασμού

ΜΙΧΑΗΛ ΣΕΝΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ  
Δρ. ΠΕΤΟΥΣΗΣ ΜΑΡΚΟΣ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2017



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αισθάνομαι την ανάγκη να επισημάνω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και τον αδερφό μου για την υπομονή και την κατανόηση που έδειξαν κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον παππού μου για όλα όσα μου έχει προσφέρει και στην αμέριστη υποστήριξη του σε κάθε μου επιλογή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μάρκο Πετούση για την εμπιστοσύνη και την αφιέρωση του πολύτιμου χρόνου του σε ότι και αν χρειάστηκα.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ψυχρός ψεκασμός (cold gas dynamic spray ή cold spray) είναι η τελευταία εξέλιξη στις τεχνικές θερμικού ψεκασμού. Είναι μια διαδικασία όπου οι στερεές σκόνες επιταχύνονται από ένα ακροφύσιο (de laval ) προς ένα υπόστρωμα. Ουσιαστικά αποτελείται από σωματίδια σκόνης εμβαδού μεταξύ 5 έως 100mm. Τα σωματίδια της σκόνης τροφοδοσίας επιταχύνονται σε υψηλότερες ταχύτητες σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές ψεκασμού και θερμαίνονται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης των υλικών της σκόνης και του υποστρώματος. Εάν η ταχύτητα κρούσης υπερβαίνει το κατώτατο όριο τα σωματίδια υπομένουν την πλαστική παραμόρφωση και κολλάνε στην επιφάνεια.

Επίσης διαφορετικά υλικά όπως μέταλλα, κεραμικά και σύνθετα υλικά και πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον ψυχρό ψεκασμό δημιουργώντας μια πλούσια γκάμα από ιδιαίτερες ιδιότητες. Ο ψυχρός ψεκασμός είναι μια νέα και υποσχόμενη τεχνολογία επίστρωσης-επικάλυψης της επιφάνειας προσφέροντας πολλά τεχνολογικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον θερμικό ψεκασμό, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί την κινητική ενέργεια αντί της θερμικής ενέργειας για την απόθεση υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να αποφευχθούν η οξειδωση και οι ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις από την υπολειπομένη εφελκυστική τάση.

Στην εξέλιξη της μεθόδου, οι διάφορες εφαρμογές που αναπτυχθήκαν αρχικά δημιουργούσαν επικαλύψεις ψυχρού ψεκασμού διαφορετικών υλικών όπως Cu(χαλκού) και Ti (τιτανίου), που έχουν πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία, οι επικαλύψεις αυτές μελετήθηκαν ως προς τη μικροδομή τους, ώστε να προσδιοριστεί το υλικό που ήταν καταλληλότερο για χρήση στον ψυχρό ψεκασμό. Η καλύτερη επικάλυψη ψυχρού ψεκασμού, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, είναι αυτή με υλικό τον χαλκό (Cu) διότι ήταν συμπαγής, δεν περιείχε οξειδία και η διεπιφάνεια της με το υπόστρωμα κράματος αλουμινίου (Al2017) δεν παρουσίασε ατέλειες (ρωγμές ή κενά). Ο χαλκός αποδείχθηκε ιδανικό υλικό για τον ψυχρό ψεκασμό εξαιτίας της ισχυρής παραμόρφωσής του.

Δεδομένου ότι ο συνολικός αριθμός των μελετών για το θέμα αυτό αναπτύσσεται ραγδαία θα ήταν απαραίτητη μια σύνοψη για την τρέχουσα κατάσταση. Η καταγραφή της τρέχουσας τεχνολογικής στάθμης θα δώσει έμφαση στις καινοτόμες εφαρμογές περιλαμβάνοντας μεταλλικά, κεραμικά και σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (MMC) για την επικάλυψη καθώς και στον τρόπο εφαρμογής τους.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η περιγραφή της αρχής λειτουργίας της τεχνολογίας, η καταγραφή της υπάρχουσας τεχνολογικής στάθμης στην τεχνολογία του ψυχρού ψεκασμού, των διαθέσιμων εμπορικών μηχανών και των εφαρμογών χρήσης της τεχνολογίας, που έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία και το διαδίκτυο.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ψυχρός ψεκασμός, διεργασίες εναπόθεσης, τεχνολογία ψεκασμού

## ABSTRACT

Cold gas dynamic spray or cold spray is the latest development in thermal spray techniques. It is a process where solid powders are accelerated from a de laval nozzle to a substrate. It essentially consists of dust particles in the range of 5 to 100mm. Powder dust particles are accelerated at higher speeds than traditional spray techniques and are heated to a temperature lower than the melting temperature of the powder and substrate materials. If the impact velocity exceeds the threshold, the particles undergo the plastic deformation and stick to the surface.

Also different materials such as metals, ceramics and composites and polymers can be used in cold spraying to create a rich array of particular properties. Cold Spraying is a new and promising surface coating technology offering many technological advantages over thermal spraying as it uses kinetic energy instead of thermal energy for depositing material. This has the effect of avoiding oxidation and undesirable chemical reactions from residual stress.

Originally, cold spray coatings of different materials such as Cu (copper) and Ti (titanium) have been created, with a variety of industrial applications. These coatings were studied in their microstructure to determine the material most suitable for use in cold spray. The best cold spray coating was made with Copper (Cu) material because it was compact, did not contain oxides, and its interface with aluminum alloy substrate (Al2017) showed no flaws (cracks or voids). Copper proved to be an ideal material for cold spraying because of its strong deformation.

As the total number of studies on this issue is growing rapidly, a summary of the current situation would be needed. The recording of the current technological level will focus on innovative applications including metal, ceramic and composite metal matrix (SMC) coatings and how they are applied.

The purpose of this dissertation is to describe the principle of operating the technology, to record the existing technological level in cold spraying technology, available commercial machines and technology applications, which have been presented in the international bibliography and the internet.

**KEY WORDS:** Cold spray, deposition processes, spraying technology





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Ιστορικό του cold spray.....	11
1.2 Άλλες διεργασίες spray.....	12
1.3 Χρήση της τεχνολογίας Cold Spray.....	16
1.4 Ποιότητα επίστρωσης.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ CGDS – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	41
2.1 Η δομή τριπλής κρούσης.....	45
2.2 Μορφές κυμάτων πρόσκρουσης κατά τη πρόσκρουση.....	49
2.3 Η διαδικασία της συγκόλλησης.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ COLD SPRAY.....	59
3.1 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά πρώτης ύλης.....	60
3.1.1 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων.....	61
3.1.2 Μορφολογία σωματιδίων.....	61
3.1.3 Χημική καθαρότητα.....	62
3.1.4 Ρευστότητα.....	63
3.2 Μέθοδοι παραγωγής σκόνης.....	63
3.2.1 Ατομιοποίηση.....	65
3.2.2 Ξήρανση με ψεκασμό (συσσωμάτωση).....	68
3.2.3 Συγκόλληση και σύνθλιψη.....	68
3.2.4 Υδρίδια-Ανυδρίδια.....	68
3.2.5 Άλλες διαδικασίες παραγωγής.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> ΕΜΠΟΡΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ COLD SPRAY.....	71
4.1 Ακροφύσια ψυχρού ψεκασμού.....	71
4.1.1 Κατάντη εξοπλισμός έγχυσης.....	72
4.1.2 Ανάντη εξοπλισμός έγχυσης.....	76
4.2 Αυτοματισμοί της διαδικασίας cold spray.....	80

---

4.2.1	Βιομηχανικός αυτοματισμός.....	80
4.2.2	Αυτοματισμοί του ελέγχου διεργασιών cold spray .....	82
4.2.3	Χειρισμός όπλου συσκευής.....	83
4.2.4	Αυτοματισμοί ασφαλείας.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....		91
ΒΙΒΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		93

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται γενικά η τεχνολογία CGDS που σχετίζεται με την έρευνα που παρουσιάζεται σε αυτή τη εργασία.

### 1.1 Ιστορικό του cold spray

Η απόδοση του εξοπλισμού, η αξιοπιστία του και το προσδόκιμο ζωής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ανάπτυξη και την εφαρμογή διαφόρων προστατευτικών επιστρώσεων (στις επιφάνειές του) που παρέχουν ένα μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν μπορούν να επιτευχθούν με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Μία από τις πολλά υποσχόμενες μεθόδους προστασίας από τη φθορά στη σύγχρονη τεχνολογία είναι η CGDS που επιτρέπει την ικανοποίηση αυστηρών απαιτήσεων και τη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας και της ζωής των μηχανημάτων και μηχανισμών.

Η τεχνολογία CGDS, που συχνά αναφέρεται απλά ως ψυχρός ψεκασμός (CS), είναι μια διαδικασία εφαρμογής επικαλύψεων όπου ένα μεταλλικό ή διηλεκτρικό υπόστρωμα εκτίθεται σε μια υψηλής ταχύτητας (300-1200 m / s) δέσμη μικρών σωματιδίων (1-50 μm) που κινούνται μέσω ενός υπερηχητικού πίδακα συμπιεσμένου αερίου. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στην επιλογή του συνδυασμού της θερμοκρασίας, της ταχύτητας και του μεγέθους των σωματιδίων που επιτρέπει τον ψεκασμό στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία (Parygin et al., 2007). Για να προκύψουν καλής ποιότητας επιστρώσεις, αυτές οι παράμετροι ψεκασμού θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά και στη συνέχεια να βελτιστοποιούνται.

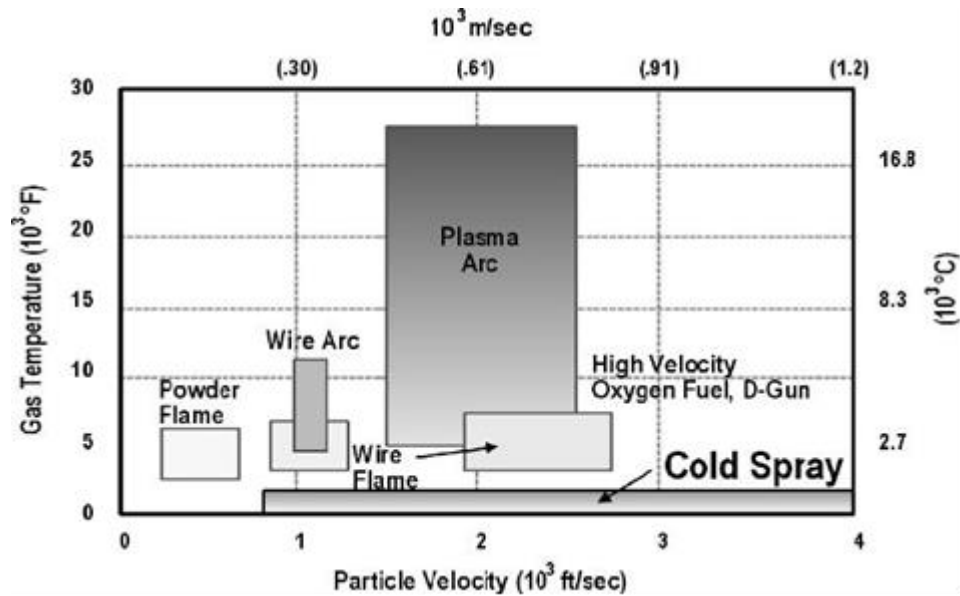
Η τεχνολογία αναπτύχθηκε αρχικά στα μέσα της δεκαετίας του '80 στο Ινστιτούτο Θεωρητικής και Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Τμήματος Σιβηρίας της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών (ITAM του RAS) στο Νοβοσιμπίρσκ από τον Δρ. Ανατόλι Παπυρίν και τους συναδέλφους του. Οι Ρώσοι επιστήμονες εναπόθεσαν επιτυχώς μια μεγάλη ποικιλία από καθαρά μέταλλα, μεταλλικά κράματα, πολυμερή και σύνθετα υλικά σε μια ποικιλία υλικών υποστρώματος. Επιπρόσθετα, έδειξαν ότι πολύ υψηλά ποσοστά απόθεσης επικάλυψης της τάξης των 5 m<sup>2</sup> / min είναι εφικτά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο CGDS (Grujicic et al., 2003).

Κατά συνέπεια, το CGDS διευκολύνει την ανάπτυξη μιας νέας γενιάς εξαιρετικά ανθεκτικών υλικών και επεξεργασιών επιφανειών που χρησιμοποιούνται σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, την αεροδιαστημική βιομηχανία και τα βιο-εμφυτεύματα. Ένα παράδειγμα από την άποψη αυτή είναι

το τιτάνιο (Ti) και τα κράματά του που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική βιομηχανία για την επικάλυψη ή την κατασκευή των εξαρτημάτων του αεροδιαστημικού κινητήρα με ανθεκτικά στη φθορά επιχρίσματα για την πρόληψη της διάβρωσης λόγω φθοράς, οξειδωσης και ακραίων θερμοκρασιών. Επίσης, καθώς η CGDS είναι μία διεργασία 100% στερεάς κατάστασης με την κρυσταλλική δομή των σκονών να διατηρούνται πλήρως στις επιστρώσεις, η εναπόθεση στον αέρα των επικαλύψεων Ti χωρίς σημαντικούς μετασχηματισμούς οξειδωσης και φάσης αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό τεχνικό επίτευγμα (Lima κ.ά., 2002).

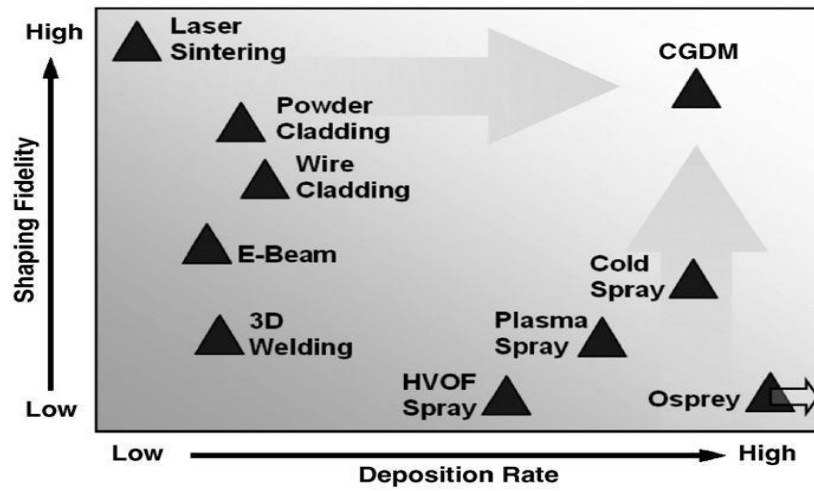
## 1.2 Άλλες διεργασίες spray

Το σύστημα CGDS ανταγωνίζεται τις παραδοσιακές διαδικασίες θερμικού ψεκασμού (TS), όπως ψεκασμός υψηλής ταχύτητας με οξυγόνο (HVOF), ψεκασμός πλάσματος (PS), ψεκασμός τόξου (AS), ψεκασμός πυρκαγιάς (DS), ψεκασμό με φλόγα (FS), τρισδιάστατη συγκόλληση, επένδυση καλωδίων και τη σύντηξη με λέιζερ για την εφαρμογή προστατευτικών επιστρώσεων σε κομμάτια και για την επιδιόρθωση φθαρμένων εξαρτημάτων. Το σχήμα 1 δείχνει ότι οι θερμοκρασίες αερίων στη διαδικασία CGDS είναι οι χαμηλότερες από τις διεργασίες επίστρωσης ψεκασμού και οι ταχύτητες σωματιδίων είναι από τις υψηλότερες. Η κύρια διαφορά που χωρίζει το CGDS από τις συμβατικές διεργασίες επικάλυψης TS είναι ότι σε μεθόδους TS, το υλικό επικάλυψης θερμαίνεται σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλές ώστε να επάγουν τήξη και κατά συνέπεια η υψηλή εισροή θερμότητας στο τμήμα που επιστρώνεται ή επισκευάζεται μπορεί να είναι επιζήμια εάν το υλικό υποβαθμίζεται. Αυτό το πρόβλημα αποφεύγεται στο CGDS (Grujicic et al., 2003) δεδομένου ότι η διεργασία διεξάγεται σε θερμοκρασίες πολύ κάτω από τα σημεία τήξης τόσο του υλικού επικάλυψης όσο και του υποστρώματος με σωματίδια που αποτίθενται στη στερεά κατάσταση λόγω πλαστικής παραμόρφωσης (Parygin AN, 2006).

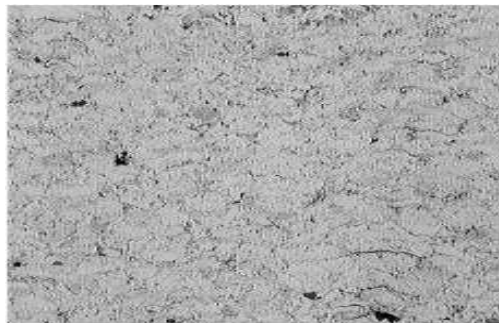


Σχήμα 1 Θερμοκρασία έναντι ταχυτήτων για τις διεργασίες TS σε σύγκριση με το CGDS (Papyrin A.N., 2006)

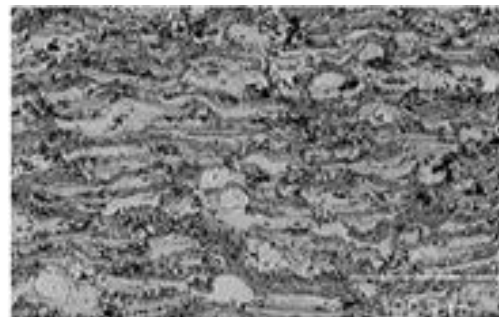
Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2 (α), το CGDS έχει ένα υψηλό ποσοστό εναπόθεσης σωματιδίων σε συνδυασμό με μια αρκετά καλή πιστότητα ή συμμόρφωση για τη διαμόρφωση του προϊόντος σε σύγκριση με τις συμβατικές διεργασίες επικάλυψης TS. Είναι η ικανότητα της διαδικασίας να αναπτύσσει γρήγορα παχιά επίστρωση και πολύπλοκα ανεξάρτητα σχήματα που τη διακρίνουν από αυτές τις τεχνικές TS. Ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των πρόσθετων ιδιοτήτων του CGDS με τις αφαιρετικές ιδιότητες της υψηλής ταχύτητας κατεργασίας, χρησιμοποιείται μια διαδικασία δυναμικής παραγωγής ψυχρού αερίου (CGDM) για την ταχεία κατασκευή αποτελεσματικών μηχανικών εξαρτημάτων (Pattison et al., 2007). Επιπρόσθετα, το Σχήμα 2 (β) δείχνει ότι μια επίστρωση με ψεκασμό με ψυχρή επίστρωση Cu έχει ανώτερη πυκνότητα και περιεκτικότητα και λιγότερο οξειδίο (0.3% κ.β.) από την επικάλυψη με ψεκασμό πλάσματος (1.7% κ.β.), Σχήμα 2 (γ) (Papyrin, 1999).



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 2 Σύγκριση CGDS με διαδικασίες TS (α) ρυθμός εναπόθεσης έναντι πιστότητας διαμόρφωσης (Pattison et al., 2007b); (B) ψυχρή ψεκασμό και (γ) επικάλυψη Cu με ψεκασμό αέρα (Parygin, 2006, Smith, 1999)

Αυτή η μη θερμική προσέγγιση επιτρέπει την εναπόθεση ευρύτερου φάσματος βιομηχανικών κραμάτων πιο γρήγορα, με μεγαλύτερη ακρίβεια και με μεγαλύτερη ακεραιότητα του υλικού. Καθώς η διαδικασία CGDS δεν συνεπάγεται τη χρήση πηγής θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας αλλά της κινητικής ενέργειας (ΚΕ) σωματιδίων για να επιτευχθεί η συγκόλληση μέσω πλαστικής παραμόρφωσης κατά την πρόσκρουση με το υπόστρωμα, προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι των τεχνολογιών εναπόθεσης υλικού TS που υποφέρουν από τις επιζήμιες επιπτώσεις της επεξεργασίας σε υψηλή θερμοκρασία. Μεταξύ αυτών των πλεονεκτημάτων, τα σημαντικότερα είναι (Karthikeyan et al., 2004, Maev et al., 2008):

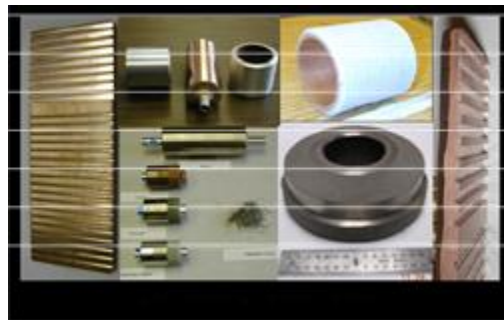
- Υλικά εναπόθεσης ευαίσθητα στην θερμότητα και το οξυγόνο (π.χ. Cu και Ti) μπορούν να ψεκάζονται εν ψυχρώ χωρίς σημαντική υποβάθμιση υλικού.
- Οι διαχωρισμοί των στοιχείων κράματος κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης δεν εμφανίζονται κατά τον ψεκασμό εν ψυχρώ. Κατά συνέπεια, επιτυγχάνονται ελκυστικές ιδιότητες όπως λιγότερο πορώδεις και πυκνές επικαλύψεις.
- Η ποσότητα θερμότητας που παραδίδεται στο επικαλυμμένο τμήμα είναι σχετικά μικρή, ώστε οι μικροδομικές, μηχανικές και χημικές μεταβολές στις ιδιότητες του υλικού υποστρώματος να είναι ελάχιστες.
- Nanofase, διαμεταλλικά και άμορφα υλικά τα οποία δεν είναι συμβατά με συμβατικές μεθόδους TS εξαιτίας της μείζονος υποβάθμισής τους, μπορούν να ψεκαστούν εν ψυχρώ.
- Το ψυχρό σπρέι ως διαδικασία κατασκευής αναπτύσσει βιομηχανικά πρωτότυπα και προωθεί νέα σχέδια γρήγορα και συγκριτικά φθηνά σε σύγκριση με τις συνήθεις διαδικασίες πρωτοτύπου.
- Η επίστρωση CGDS περιλαμβάνει πιέσεις αντί για εφελκυσμό, με μία σφυρήλατη μικροδομή και σχεδόν θεωρητική πυκνότητα.
- Το CGDS συνδέει χημικά ανόμοια υλικά με δεσμούς που μεταβαίνουν σταδιακά από μία σύνθεση υλικού σε άλλη. Ως εκ τούτου, προσφέρει εναλλακτική λύση συγκόλλησης χαμηλής θερμοκρασίας.
- Το CGDS προσφέρει αυξημένη επιχειρησιακή ασφάλεια λόγω της απουσίας ροών υψηλής θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, χαμηλού επιπέδου θορύβου (70-80 dB) και της απλής τεχνικής εφαρμογής και λειτουργίας.
- Το CGDS προσφέρει συναρπαστικές νέες δυνατότητες για οικονομικά αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις σε τεχνολογίες όπως η ηλεκτρολυτική επίστρωση, η συγκόλληση και η βαφή.

### 1.3 Χρήση της τεχνολογίας Cold Spray

Η τεχνολογία CGDS χρησιμοποιείται για την παραγωγή ελευθέρων φορμών, προστατευτικών επιχρισμάτων και στρωμάτων βελτίωσης της απόδοσης. Οι τυπικές προστατευτικές επικαλύψεις περιλαμβάνουν στρώσεις χαλκού-χρώματος για προστασία από οξείδωση κατασκευών, επιχρίσματα από αλουμίνιο ανθεκτικά στη διάβρωση για βιομηχανίες πετρελαίου και επίστρωμα MCrAlY για επικαλύψεις υψηλής θερμοκρασίας για θερμικούς φραγμούς. Το σχήμα 3 (α) δείχνει ορισμένα συστατικά με προστατευτικές επικαλύψεις που εφαρμόστηκαν με τη διαδικασία CGDS (Karthikeyan et al., 2004).



(α)



(β)

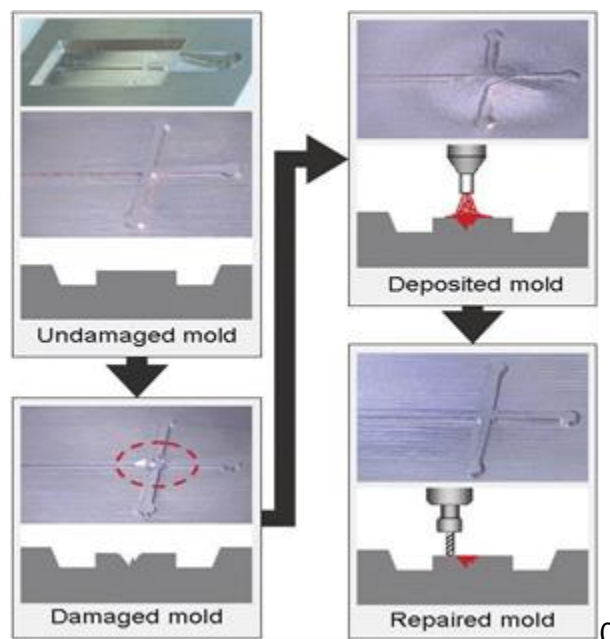
Σχήμα 3 Τυπικές παραγόμενες με ψυχρό σπρέι (α) επικαλύψεις και (β) χύδην μορφές (Karthikeyan et al., 2004)

Τα μεγάλα μεγέθη και τα σχήματα μπορούν να κατασκευαστούν με ψεκασμό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά να ενσωματώνονται εύκολα κατά την προετοιμασία του ψεκασμού και στη συνέχεια κατά το φινίρισμα. Το σχήμα 3 (β) δείχνει ορισμένες μορφές χύμα (κυλίνδρους, μανίκια και ψύκτες θερμότητας) που παράγονται από CGDS. Τέτοιες ογκώδεις μορφές παράγονται με ψεκασμό του υλικού πάνω από έναν αναλώσιμο άξονα, με κατεργασία της υπερευρείας



επίστρωσης σε απαιτούμενες διαστάσεις και στη συνέχεια αφαίρεση του άξονα με μηχανικές και / ή χημικές μεθόδους. Δεδομένου ότι το όπλο CGDS το χειρίζεται συχνά ένα ρομπότ, τα αρχεία CAD μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του σχεδίου ψεκασμού ώστε να παράγουν σχεδόν καθαρά σχήματα (NNS). Επιπλέον, με τον έλεγχο της σύνθεσης τροφοδοσίας, μπορεί να μεταβληθεί η μικροδομή και σύνθεση της εναπόθεσης για την παραγωγή υλικών βαθμιαίας μεταβολής (FGM) και άλλων ειδικών δομών (Karthikeyan et al., 2004).

Το CGDS είναι σε θέση να παράγει ένα ευρύ φάσμα πάχους στρώματος εναπόθεσης που κυμαίνεται από δεκάδες μικρών μέχρι ένα εκατοστό. Από την άποψη αυτή, αυτή η διαδικασία εκτείνεται πέρα από την έννοια της επικάλυψης ενός υποστρώματος, παρέχοντας ένα μέσο για την ανάπτυξη τρισδιάστατων δομών (McCune et al., 2000). Το σχήμα 4 δείχνει πώς χρησιμοποιείται το CGDS ως τεχνική επισκευής και κατασκευής επιφανειών στη βιομηχανία επισκευής καλουπιών. Ένα τμήμα της επιφάνειας του καλουπιού Al υπέστη βλάβη κατά τη λειτουργία και έπειτα μια επικάλυψη καθαρού Al εναποτέθηκε στην κορυφή του χρησιμοποιώντας ένα σύστημα CGDS. Το ψεκασμένο καλούπι κατασκευάζεται από μια μηχανή φρεζαρίσματος με αριθμητικό έλεγχο (CNC) χρησιμοποιώντας αρχικές διαδρομές εργαλείων του καλουπιού και το αρχικό χαρακτηριστικό του καλουπιού που ανακτάται (Lee et al., 2007).

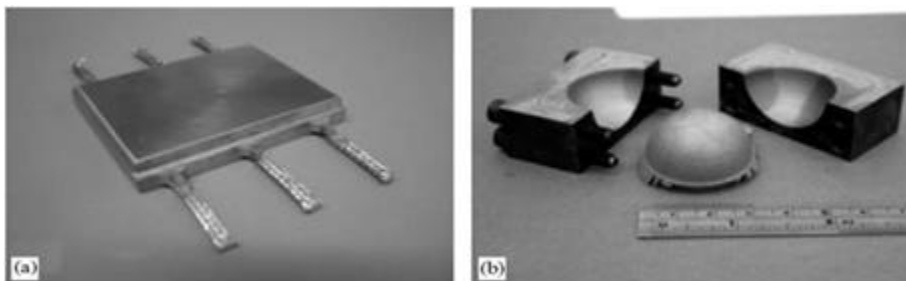


Σχήμα 4 Επισκευή καλουπιού (Lee et al., 2007)

Η σημειακή εφαρμογή υλικού από το CGDS χρησιμοποιείται επίσης για την εξισορρόπηση των περιστρεφόμενων τμημάτων όπως οι άξονες, οι τροχοί και οι ρότορες. Η επικάλυψη μπορεί να

ταιριάζει με το υπόστρωμα όπως το Al σε έναν άξονα κίνησης Al ή θα μπορούσε να είναι ένα διαφορετικό υλικό επιλεγμένο για την πυκνότητα ή το χρώμα του. Τέλος, ο στενός δεσμός μεταξύ του υποστρώματος και της επικάλυψης εξασφαλίζει τη μέγιστη μεταφορά θερμότητας και ως εκ τούτου είναι δυνατόν να ψεκαστούν θερμαντικοί συλλέκτες Cu απευθείας σε ανοξειδωτο χάλυβα ή κεραμικά για να βελτιώσουν την αγωγιμότητα τους.

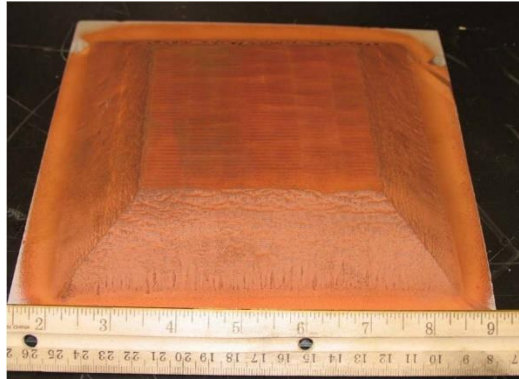
Η στερεάς κατάστασης φύση του CGDS προσφέρεται για την εναπόθεση μετάλλων πάνω σε σύνθετα υλικά και πολυμερή. Δεδομένου ότι το υπόστρωμα δεν χρειάζεται να είναι μεταλλικό ή να έχει πολύ επίπεδη επιφάνεια, η διαδικασία είναι ευνοϊκή για την ενσωμάτωση συσκευών εντός του εναποτιθέμενου υλικού. Υπό την προϋπόθεση ότι η συσκευή είναι επαρκώς σκληρή για να αντισταθεί στον βομβαρδισμό σωματιδίων, μπορούν να ψεκαστούν εύκολα αισθητήρες όπως θερμοστοιχεία και οπτικές ίνες. Με τον τρόπο αυτό, τα συστατικά μπορούν να δημιουργηθούν σε ένα μόνο βήμα χωρίς την ανάγκη σύνθετων λιθογραφικών τεχνικών. Το σχήμα 5 (α) δείχνει θερμοστοιχεία με τρία φύλλα ενσωματωμένα σε ένα τμήμα Ti χωρίς απώλεια λειτουργικότητας. Ένα πρώτο στρώμα υλικού εναποτίθεται και στη συνέχεια τοποθετείται ένα δεύτερο που περιέχει τρεις αυλακώσεις. Οι πομποί τοποθετούνται μέσα στις αυλακώσεις και συσφίγγονται στη θέση τους. Ένα τρίτο και τελικό στρώμα προστίθεται για την ολοκλήρωση της δομής. Μετά από αυτό, το εξάρτημα επεξεργάζεται με καθαρό σχήμα (Pattison et al., 2007b).



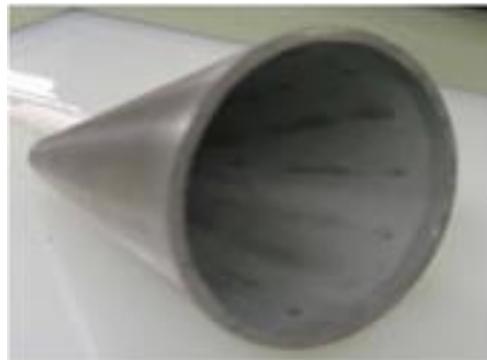
Σχήμα 5 Φωτογραφίες που δείχνουν (α) τρία θερμομονωτικά στοιχεία που είναι ενσωματωμένα σε ένα τμήμα Ti και (β) ένα ημισφαιρικό Ti που σχηματίζεται από ένα εργαλείο καλουπιού (Pattison et al., 2007b)

Δεδομένου ότι η μέθοδος CGDS μπορεί να αποθέσει πλήρως πυκνό υλικό, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν μορφές καλουπιού που μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία χωρίς συρρίκνωση και συνεπώς χωρίς την ανάγκη θερμής ισοστατικής συμπίεσης (HIPing). Το Σχήμα 5 (β) δείχνει μία ημισφαιρική μορφή καλουπιού που δημιουργείται με ψεκασμό Ti σε ένα σκληρυμένο χυτό χαλύβδινο εργαλείο και απομακρύνεται μέσω ενός θυσιαστικού στρώματος Al (Pattison κ.ά., 2007b).

Η τεχνολογία CGDS είναι επίσης ένα βιώσιμο μέσο παραγωγής τόσο νανοκρυσταλλικών επικαλύψεων όσο και μαζικών νανοδομημένων υλικών για εφαρμογές μηχανικής. Το σχήμα 6 δείχνει πολύπλοκες γεωμετρίες ικανές από το CGDS. Στο Σχήμα 6 (α) είναι ένα μπλοκ μορφής σχεδόν δίχρωμο αποτελούμενο από 80W-20Cu wt% και στο Σχήμα 6 (β) είναι ένας κώνος.



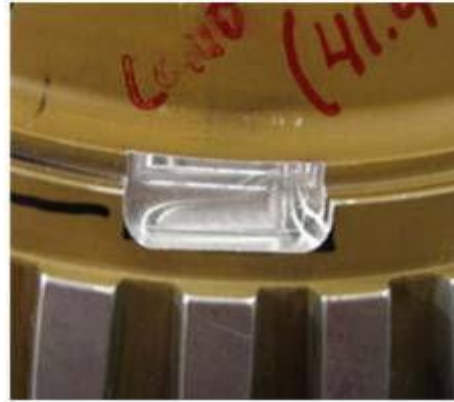
(α)



(β)

Σχήμα 6 Το καθαρό σχήμα που σχηματίζεται με το CGDS (α) 80W-20Cu βάρους% μπλοκ (β) κώνος (Champagne et al., 2007)

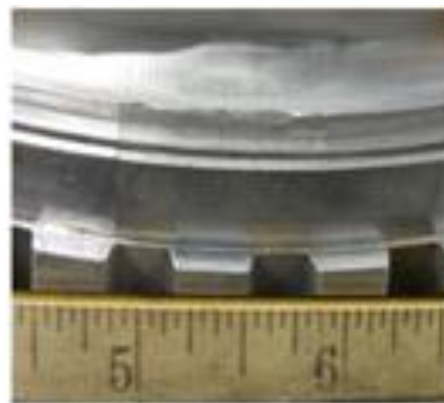
Εικονογραφημένο στο Σχήμα 7 είναι μια αυλάκωση δακτυλίου ελικοπτέρου που επισκευάστηκε χρησιμοποιώντας CGDS. Το σχήμα 7 (α) δείχνει μια περιοχή που έχει υποστεί βλάβη και το υλικό έχει αφαιρεθεί, Σχήμα 7 (β) η περιοχή είναι γεμάτη με CGDS και Το σχήμα 7 (γ) δείχνει μια εκ νέου επεξεργασμένη αυλάκωση δακτυλίου.



(α)



(β)



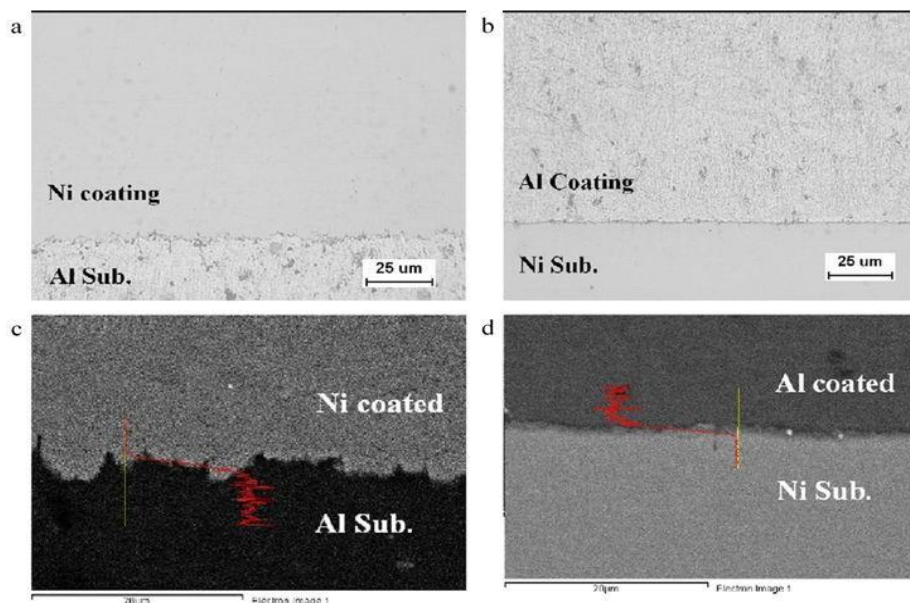
(γ)

*Σχήμα 7 Επισκευή αύλακας δακτυλίου ελικοπτήρου (α) μεταλλικό στοιχείο που έχει αφαιρεθεί από την αυλάκωση δακτυλίου (β) περιοχή γεμισμένη με CGDS (c) επανασχεδιασμένη αυλάκωση δακτυλίου (Champagne et al., 2007)*

## 1.4 Ποιότητα επίστρωσης

Το CGDS παράγει καθαρά, πυκνά και καλά συνδεδεμένα επιχρίσματα πολλών μετάλλων (Al, Cu, Ni, Ti και Zn), κραμάτων (SS, Inconels, Hastalloys, MCrAlYs) και σύνθετων υλικών -SiC, οξειδία μετάλλων όπως το Al-Alumina) (Karthikeyan et al., 2004). Οι μικροδομές των επικαλύψεων ψεκασμού βασικά εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και από την επίτευξη καλής ποιότητας επιστρώσεων, συνεπώς το σύστημα και οι παράμετροι ψεκασμού πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά.

Τα σχήματα 8 δίνουν τις μικροδομές στιλβωμένης εγκάρσιας τομής ψεκαζόμενων επικαλύψεων Al και Νί και όπως φαίνεται, πλησιάζουν τις θεωρητικές πυκνότητες στις συνθήκες ψεκασμού. Η επικάλυψη Ni, στο Σχήμα 8 (a) που λαμβάνεται κατά τον ψεκασμό ενός υποστρώματος Al με σωματίδια σκόνης Ni έχει σχεδόν την ίδια πυκνότητα με ένα αρχικό υπόστρωμα Νί, στο Σχήμα 8 (b). Περαιτέρω, το πορώδες των επικαλύψεων όπως μετράται από έναν αναλυτή εικόνας είναι μικρότερο από 3% το οποίο είναι ένα αποδεκτό επίπεδο πορώδους για τις ψεκασμένες επικαλύψεις (Lee et al., 2009).

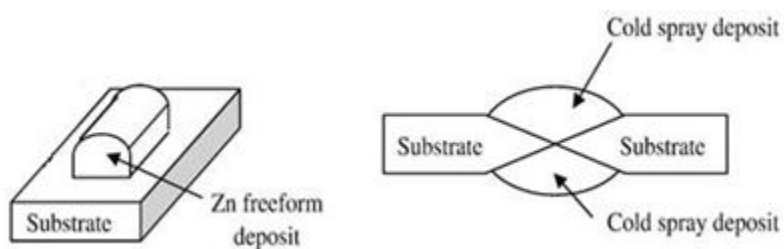


Σχήμα 8 Οι μικροδομές των επικαλυμμένων ψεκασμών αλουμινίου και Ni (Lee et al., 2009)

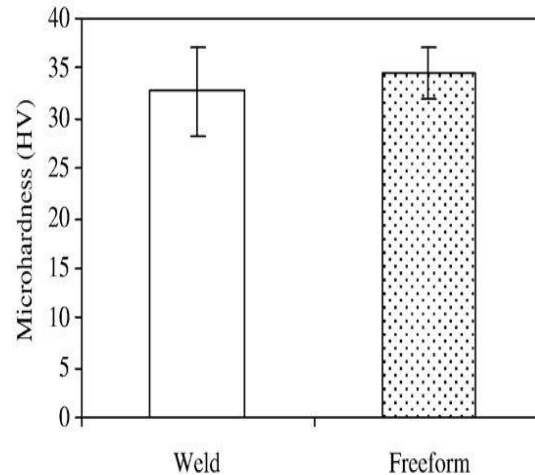
Η διάδοση των ρωγμών στις επιφάνειες CGDS συμβαίνει κατά μήκος των ορίων των σωματιδίων και όχι μέσω των παραμορφωμένων σωματιδίων και ως εκ τούτου οι μηχανικές ιδιότητες των επιχρισμάτων υπαγορεύονται από τη μηχανική αντοχή μεταξύ των αποτιθέμενων σωματιδίων (Cadney et al., 2008). Συχνά, οι πυκνές ψυχρές ψεκασμένες επικαλύψεις διαθέτουν υψηλότερη

σκληρότητα από ότι τα υποστρώματα και επομένως παρέχουν επαρκή προστασία στα υποστρώματα από φθορά και επιφανειακές ζημιές. Παρατηρείται ομαλή μετάβαση της σκληρότητας στη διεπαφή υποστρώματος / επιχρίσματος και αυτή η αυξημένη σκληρότητα (των εναποθέσεων) εξαρτάται κυρίως από δύο παραμέτρους. Το πορώδες της επίστρωσης και το βαθμός σκλήρυνσης της ψυχρής εργασίας στο εναποτιθέμενο σωματίδιο. Οι υψηλότερες τιμές σκληρότητας  $\sim 300$  GPa (για το Ni) είναι αποτέλεσμα υψηλότερου βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης κατά την εναπόθεση, ενώ η χαμηλότερη σκληρότητα προκύπτει εάν η επίστρωση είναι πιο πορώδης (Karthikeyan, 2004).

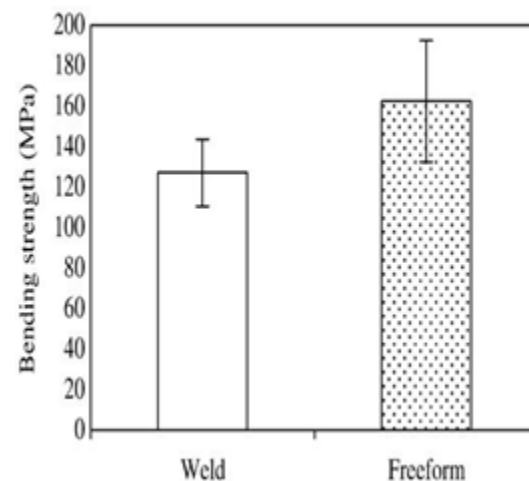
Εικονογραφημένη στα σχήματα 9 (a, b) είναι μια σχηματική απεικόνιση των υποστρωμάτων Al που χρησιμοποιούνται τόσο στην ψυχρή μορφή ψεκασμού όσο και στις γεωμετρικές συγκόλλησης με Zn ως υλικό πληρώσεως (Cadney et al., 2008). Το σχήμα 9 (γ) στη συνέχεια παρουσιάζει την αντίστοιχη μικροσυστοιχία της ελεύθερης μορφής και των καταλοίπων συγκόλλησης, χωρίς σημαντική διαφορά μεταξύ των μετρήσεων. Ενώ ο πυρήνας της συγκόλλησης έχει μικροσυστοιχία  $33 \pm 3,2$  HV η ελευθέρα μορφή είναι μικροσκοπική  $34 \pm 2,5$  HV. Αυτή η ομοιότητα δείχνει ότι η διαδικασία CGDS είναι αναπαραγώγιμη για παραγωγή είτε συγκολλήσεων είτε ελεύθερων μορφών. Επίσης, αυτά τα αποτελέσματα ψυχρής ψεκασμού συγκόλλησης και σκληρότητας ελεύθερης μορφής είναι εντός του εύρους των τιμών μικροσκληρότητας για ανόπτηση (30 HV) και πλήρως σκληρυμένου (35 HV) καθαρού Zn, υποδηλώνοντας ότι κάποια σκλήρυνση της εργασίας συμβαίνει στο CGDS (Cadney et al., 2008).



Σχηματική απεικόνιση της (α) ελεύθερης μορφής και (β) γεωμετρικών συγκόλλησης (Cadney et al., 2008)



(γ)



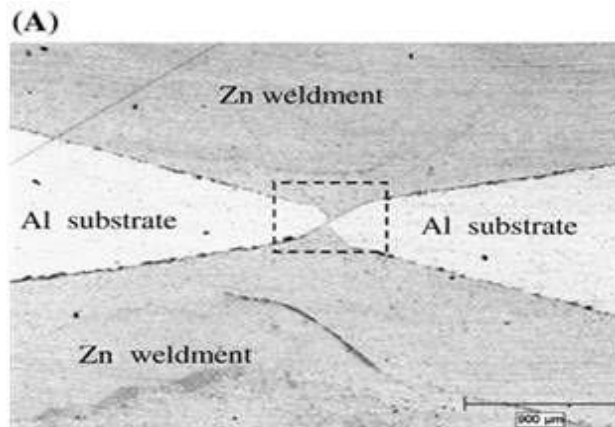
(δ)

Σχήμα 9 Μέθοδοι μέτρησης ελεύθερης μορφής και συγκόλλησης μηχανικών ιδιοτήτων (γ) μικροσυστοιχία και (δ) αντοχή σε κάμψη (Cadney et al., 2008)

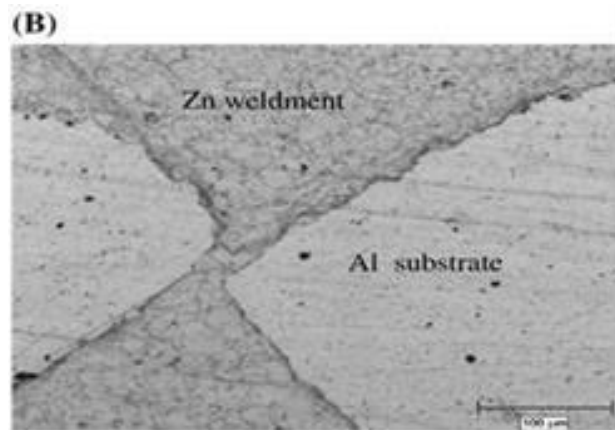
Το σχήμα 9 (δ) παρουσιάζει περαιτέρω τις ιδιότητες αντοχής στην κάμψη και για τις δύο διαμορφώσεις. Η διαμόρφωση συγκόλλησης έχει αντοχή σε κάμψη  $127 \pm 17$  MPa ενώ η ελεύθερη μορφή έχει αντοχή  $162 \pm 30$  MPa. Καμία στατιστική διάκριση δεν μπορεί να γίνει μεταξύ της αντοχής αυτών των δύο σχηματισμών και οι τιμές τους είναι συγκρίσιμες με τιμές για 99,95% καθαρό Zn, (Cadney et al., 2008).

Το σχήμα 10 (α) παρουσιάζει μία οπτική μικρογραφία της εγκάρσιας τομής ενός τμήματος που συνδέεται με το CGDS, με αμφότερες τις πλευρές της συγκόλλησης επιτυχώς γεμισμένες από τα ψεκασμένα σωματίδια. Το σχήμα 10 (b) δείχνει μια μεγεθυμένη μικρογραφία που αντιστοιχεί στο

σημείο επαφής μεταξύ των δύο αλκαλικών υποστρωμάτων. Τα υποστρώματα δεν έρχονται σε επαφή και είναι ελαφρώς ευθυγραμμισμένα. Παρ'όλα αυτά, τα ψεκασμένα σωματίδια ήταν ικανά να παραμορφώσουν και να γεμίσουν την περιοχή μεταξύ των δύο υποστρωμάτων, μην αφήνοντας καμία πορώδη περιοχή στο σημείο επαφής. Οι μικρογραφίες απεικονίζουν επίσης την έλλειψη προσκόλλησης μεταξύ των ψεκασμένων σωματιδίων και των επιφανειών των υποστρωμάτων, πράγμα που δείχνει ότι μπορεί να επιτευχθεί μία απόθεση CGDS σε μια ελαφρώς γωνιακή επιφάνεια, εφόσον το φυσιολογικό συστατικό της ταχύτητας πρόσκρουσης των σωματιδίων φτάνει στην εξαρτώμενη από το υλικό κρίσιμη ταχύτητα (Cadney et al., 2008).



(α)



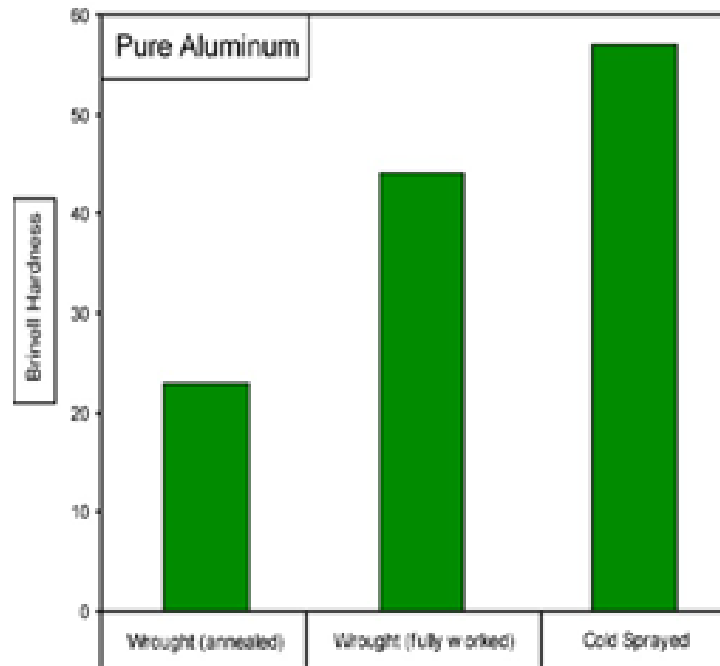
(β)

Σχήμα 10 Οπτική μικρογραφία διασταυρούμενων περιοχών μιας συγκόλλησης CGDS (Cadney et al., 2008)

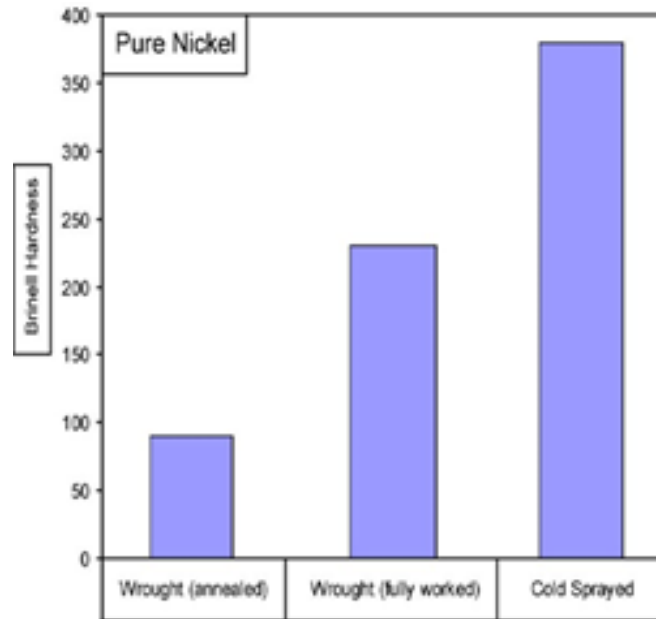
Λόγω της διεργασίας σκλήρυνσης που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης, οι ψυχρές ψεκασμένες επιχρίσεις επιτυγχάνουν μια εκλεπτυσμένη μικροδομή



των σωματιδίων ψεκασμού και μπορούν να επιτύχουν σημαντικά υψηλότερες τιμές σκληρότητας από τα συμβατικά επεξεργασμένα υλικά (Champagne et al., 2007). Το σχήμα 11 δείχνει την σκληρότητα των ψυχρών ψεκασμένων και επεξεργασμένων (τόσο ανθεκτικών όσο και πλήρως επεξεργασμένων) υλικών Al και Ni. Εξετάζοντας το Σχήμα 11 (α), το ψεκασμένο με ψεκασμό Al έχει σκληρότητα Brinell 57 BHN ενώ το ανηγμένο και πλήρως επεξεργασμένο Al έχει τιμές σκληρότητας Brinell 24 BHN και 43 BHN αντίστοιχα. Επιπλέον, λόγω της επίδρασης σκλήρυνσης του στελέχους που προκύπτει από την πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης σωματιδίων, η μικροσκληρότητα των επικαλύψεων CGDS είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των σκονών τροφοδοσίας. Παρ'όλα αυτά, η αντοχή συγκόλλησης των επικαλύψεων CGDS μειώνεται με την αύξηση του πάχους της επικάλυψης. Αυτό οφείλεται σε εσωτερικές καταπονήσεις που προκαλούνται στην επίστρωση κατά τη διάρκεια και μετά την εναπόθεση (Klinkov et al., 2005).



(α)



(β)

Σχήμα 11 Η σκληρότητα υλικών σε cold spray σε σχέση με σφυρήλατα υλικά (Champagne et al., 2007)

Ο Πίνακας 1 δίνει δεδομένα σχετικά με τις ιδιότητες ορισμένων επικαλύψεων CGDS (Karthikeyan, 2004). Παρουσιάζεται ότι (1) Το CGDS παράγει επικαλύψεις και ελεύθερες μορφές με απαιτούμενη πυκνότητα και αντοχή. (2) Επικαλύψεις ψυχρής ψεκασμού έχουν σχεδόν μηδενική ολκιμότητα στην κατάσταση ψεκασμού και η θερμική κατεργασία μετά το ψεκασμό απαιτείται για την ανάκτηση της ολκιμότητας. (3) Οι τιμές αντοχής και μέσου όρου των ψεκασμένων επικαλύψεων φτάνουν σε εκείνες του επεξεργασμένου υλικού σε ορισμένες περιπτώσεις (όπως τα κράματα 6061 Al) (Karthikeyan, 2004).

Πίνακας 1 Ιδιότητες υλικών cold spray (Karthikeyan, 2004)

		Material Properties			
Υλικό	Κατάσταση	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Yield Strength (GPa)	Ultimate Strength (GPa)	Strain (%)
Nickel	Bulk	207	59	317	0.3
	Cold sprayed	158	300	300	0.0002
	Heat treated	125	207	304	0.0956
Copper	Bulk	110	220		
	Cold sprayed	103	266		
	Heat treated	104	195		
6061 Aluminium	Bulk	65.5	83	152	18
	Cold sprayed		241	241	0
	Heat treated	51	91	157	18
Hastalloy C	Bulk	30			
	Cold sprayed	142			
	Heat treated				
CoNiCrAlY	Bulk	41			
	Cold sprayed	98			
	Heat treated				

Αν και οι διεργασίες θερμικής επεξεργασίας μειώνουν σημαντικά τη σκληρότητα της επίστρωσης λόγω της απελευθέρωσης τάσεων και της κοκκοποίησης των κόκκων (Guo et al., 2007), η απόδοση των επικαλύψεων CGDS μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τις θερμικές επεξεργασίες. Η διάχυση κατά την ανόπτηση των επικαλύψεων κλείνει τις διασυνδέσεις σωματιδίων οι οποίες βρίσκονται ακριβώς κάτω από την συμπίεση επαφής και συνεπώς μειώνουν τον αριθμό πιθανών θέσεων εκκινήσεως της ρωγμής (Gärtner et al., 2006b).

## 1.5 Παραδείγματα της διαδικασίας

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την εφαρμογή της διαδικασίας ψυχρού ψεκασμού σε διαφορετικές περιπτώσεις.

- Δημιουργία κατάλληλου προφίλ σύνδεσης σε άκρο άξονα

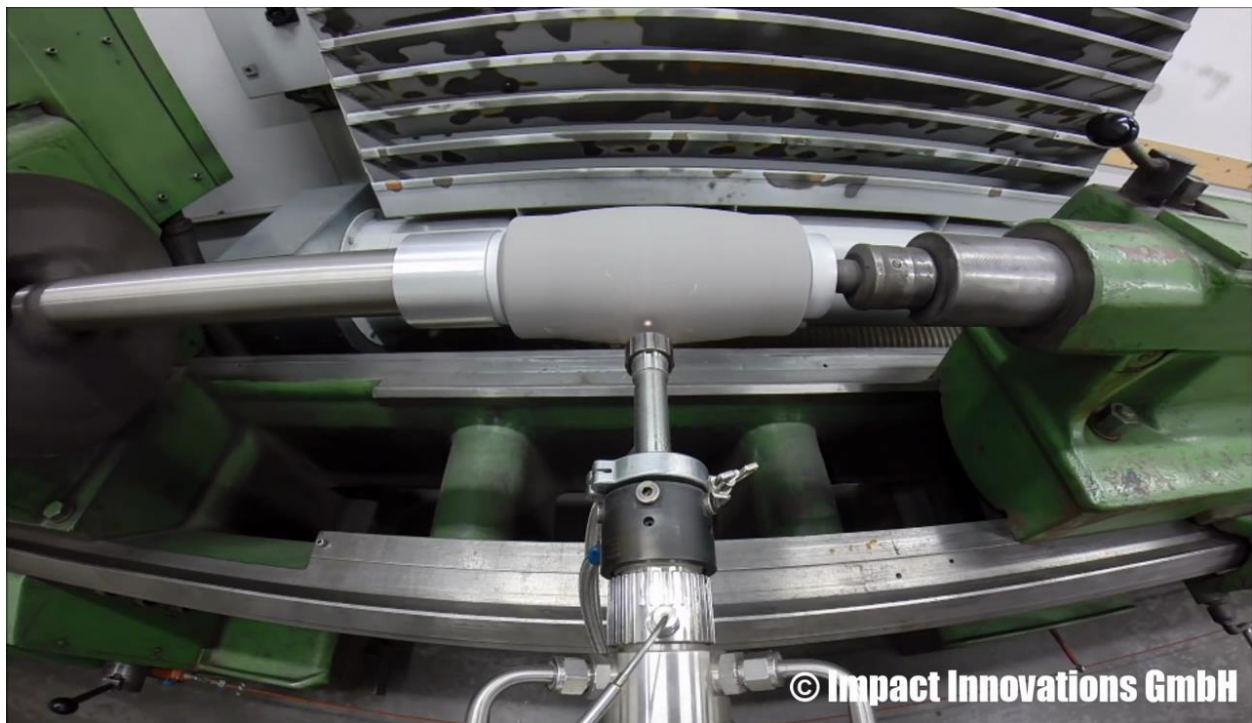
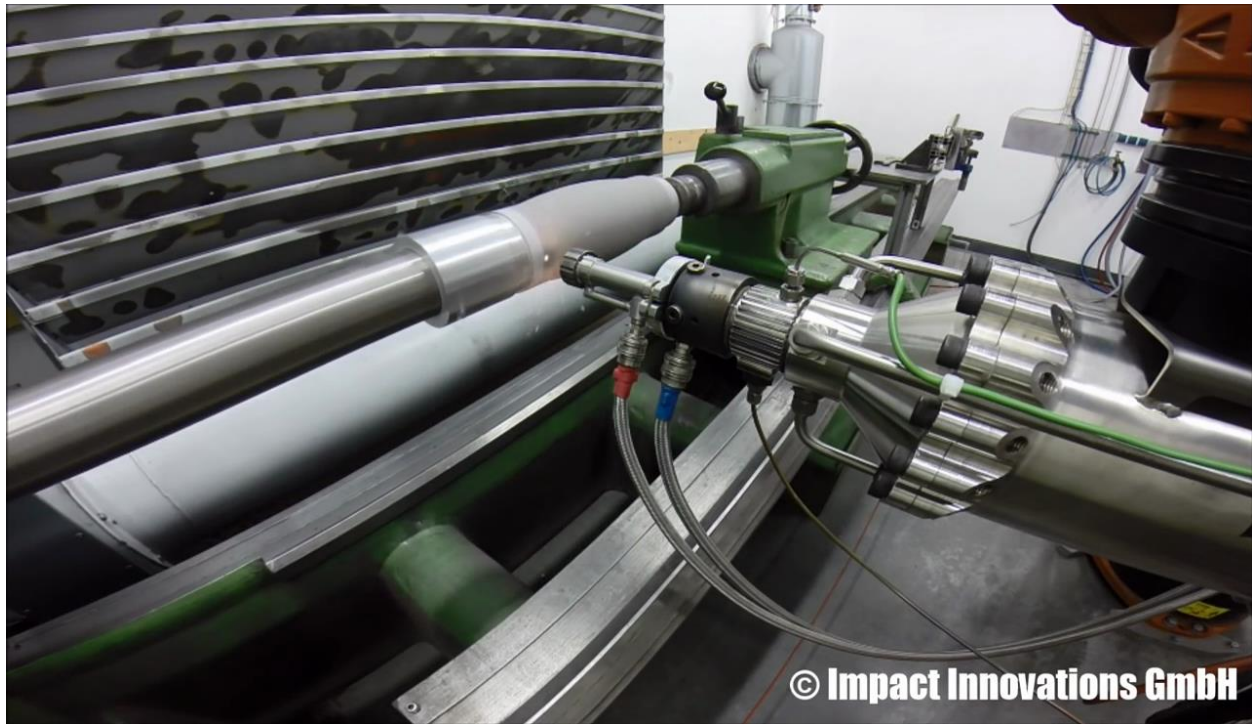




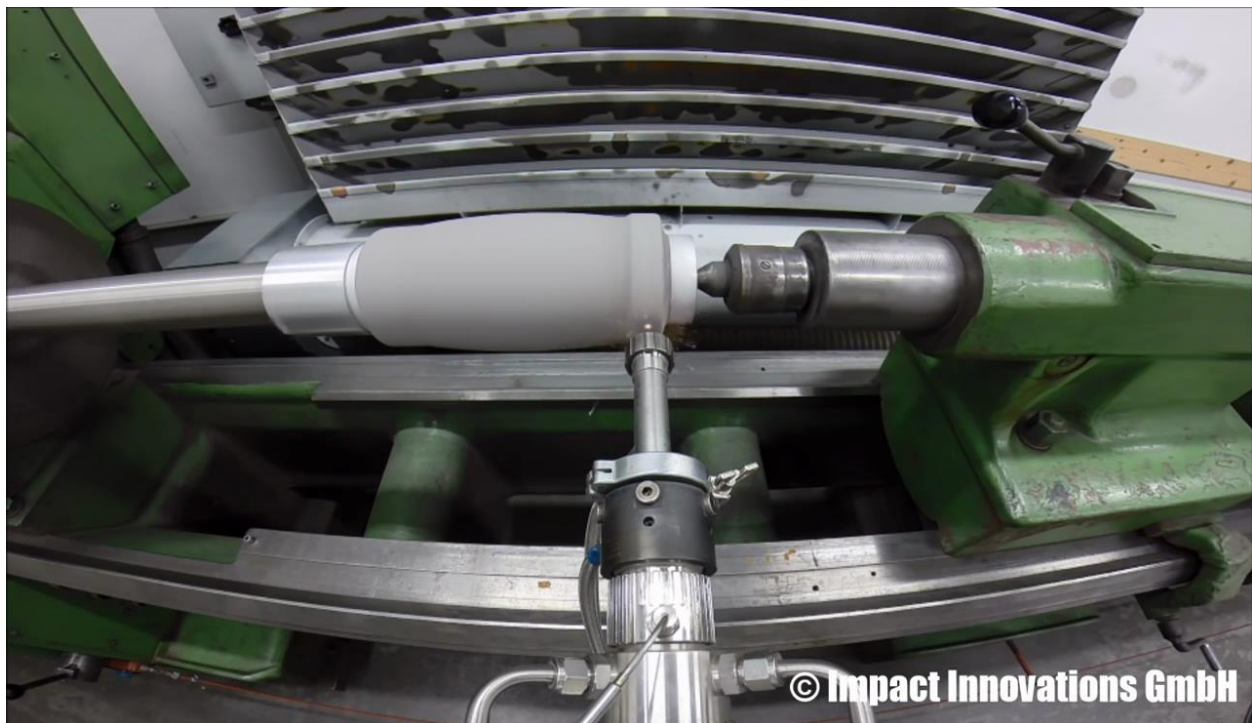
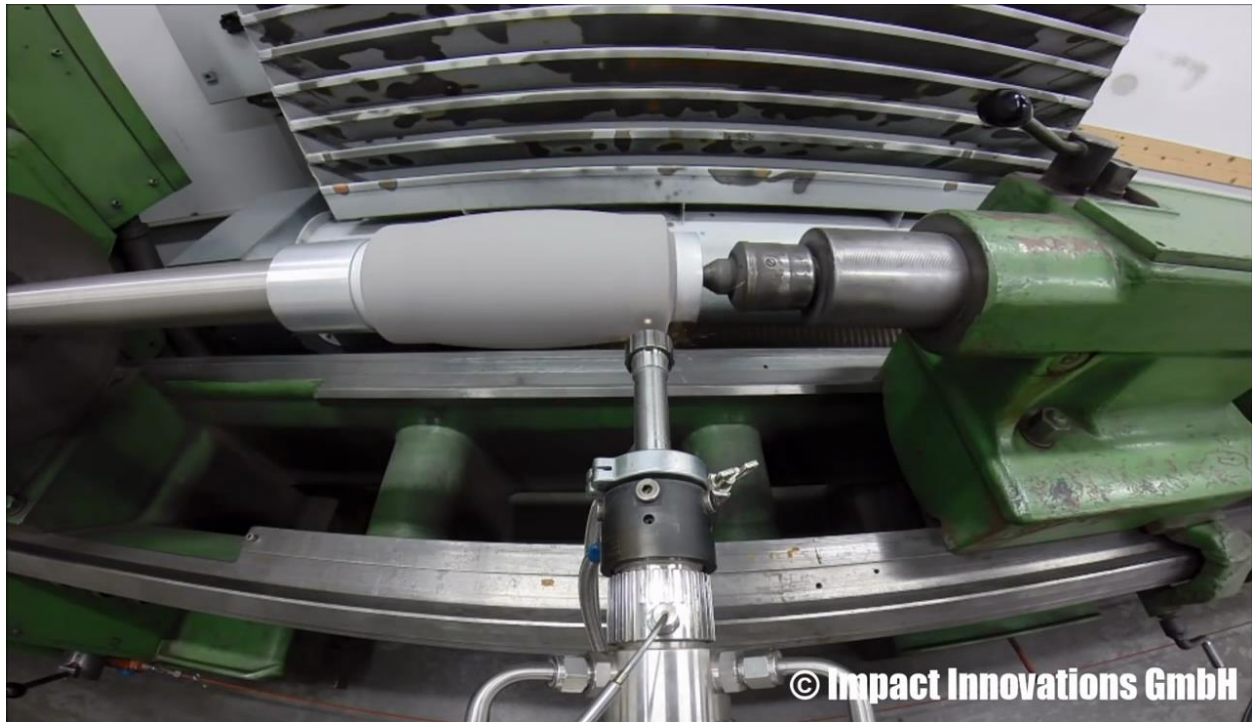


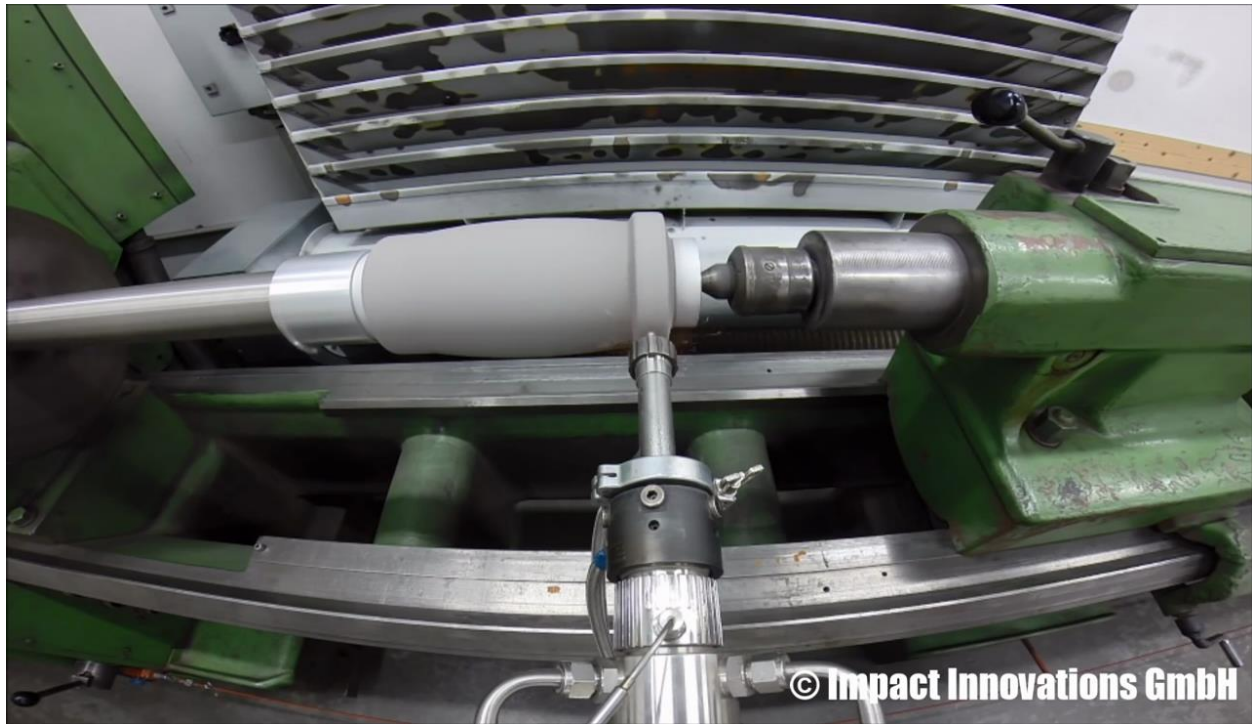
- Δημιουργία τμήματος μηχανισμού

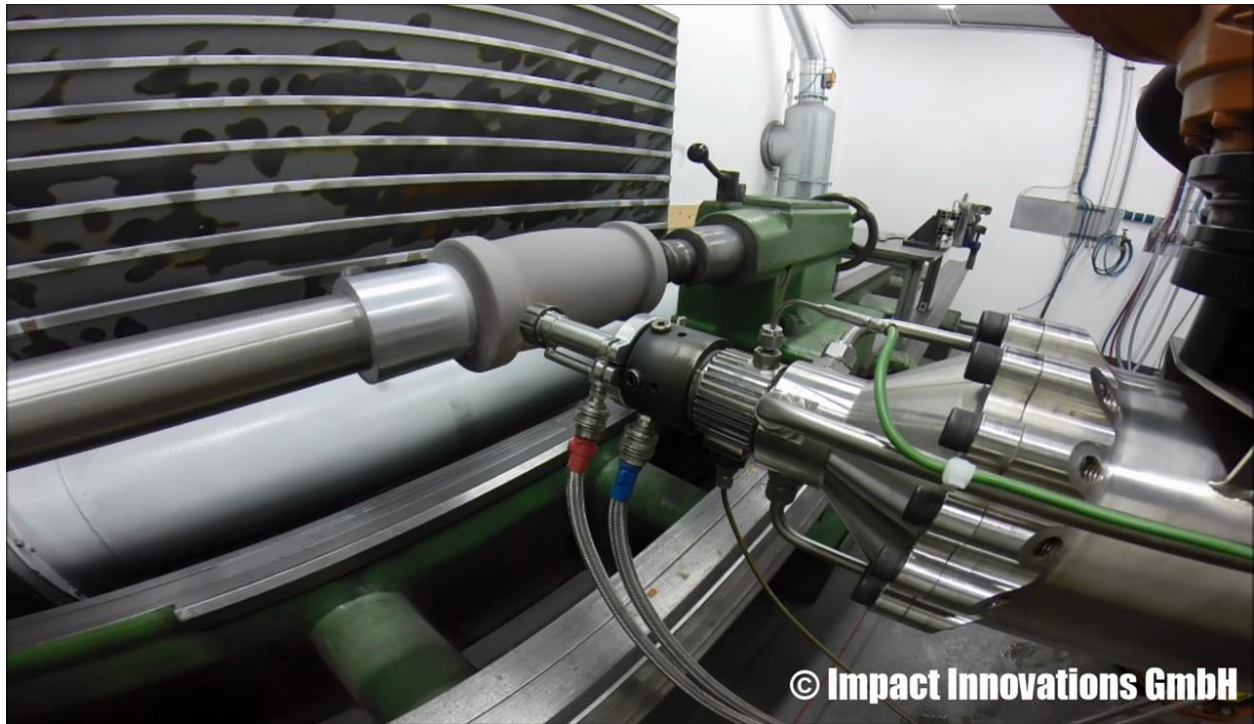




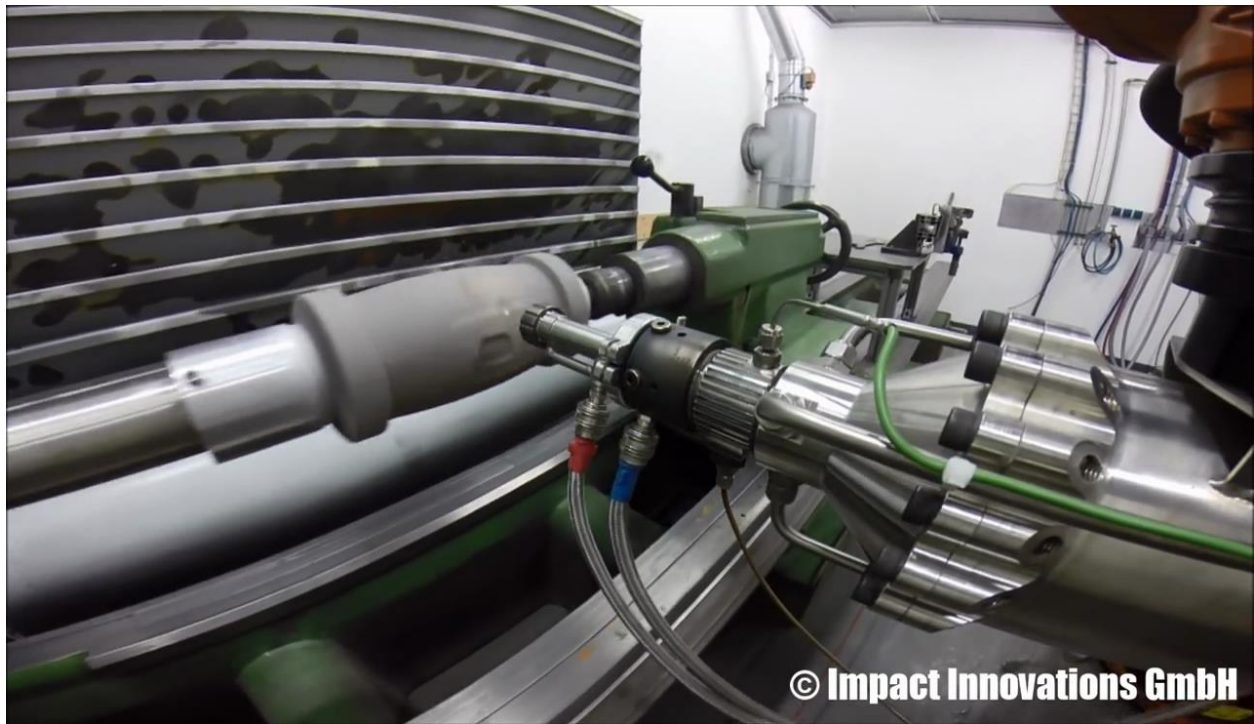








© Impact Innovations GmbH



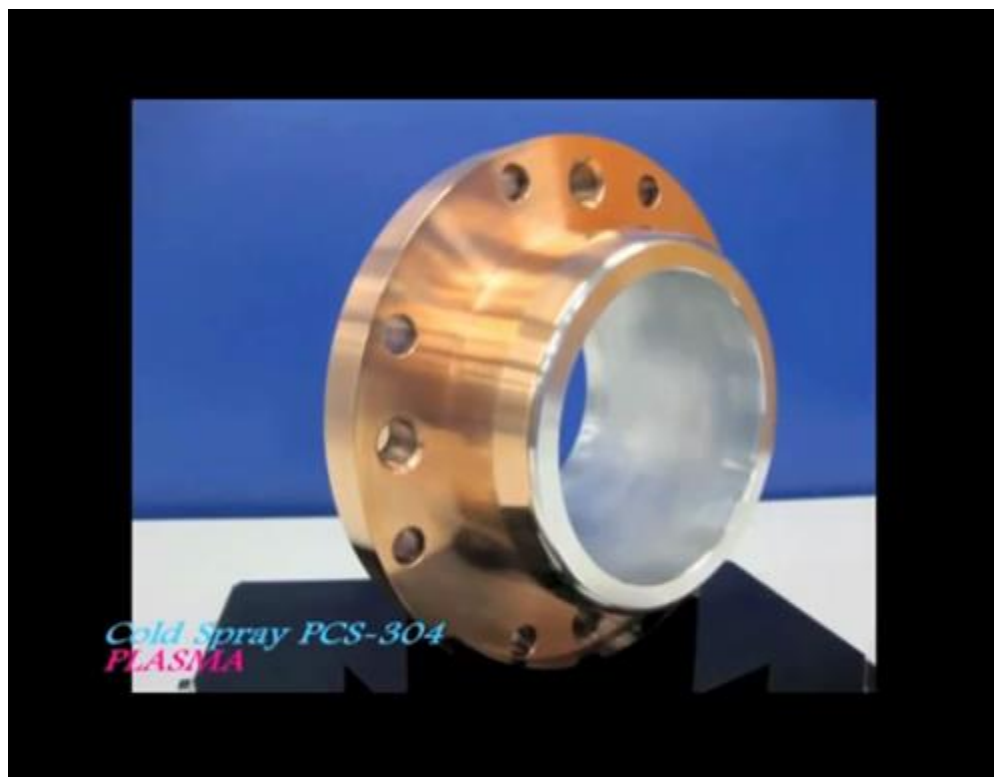
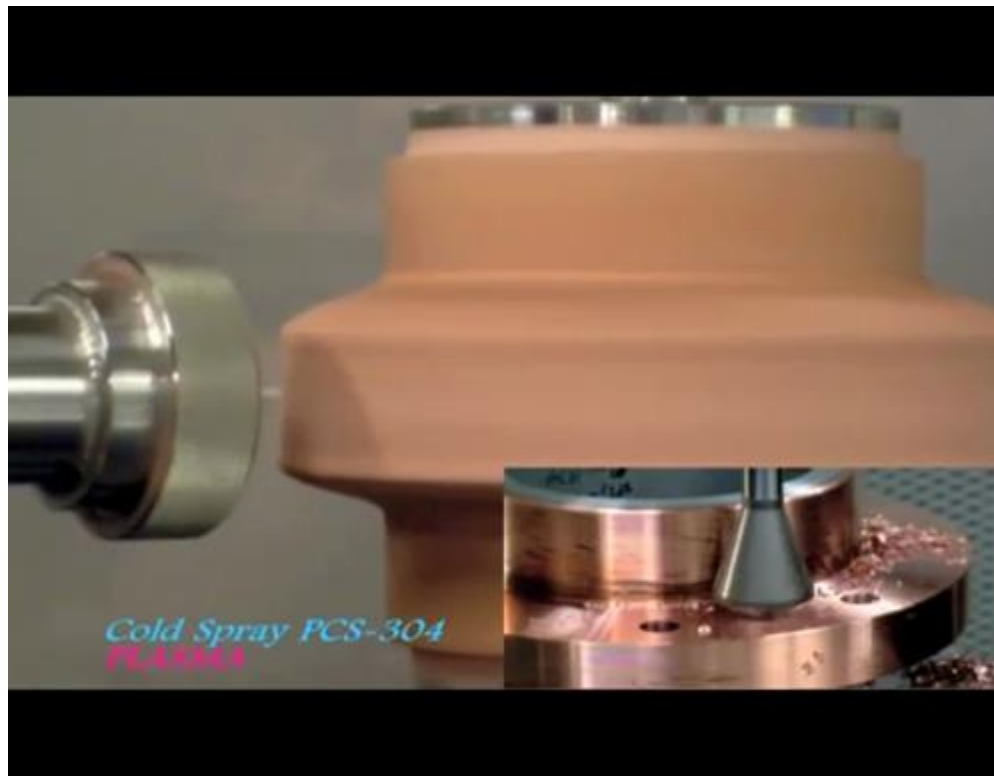
© Impact Innovations GmbH



- Κατασκευή φλάτζας από χαλκό.











## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ CGDS – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Από την εξέλιξη της τεχνολογίας στα μέσα της δεκαετίας του 1980, έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα CGDS. Τα συστήματα μπορούν είτε να κατασκευαστούν σε αρθρωτή διαμόρφωση έτσι ώστε να μπορούν εύκολα να προσαρτηθούν στον εξοπλισμό ελέγχου κίνησης για να ψεκάσουν σύνθετα σχήματα ή να κατασκευαστούν σε ένα ενιαίο ντουλάπι για να διευκολυνθεί η ευκολία εγκατάστασης σε διαφορετικές εγκαταστάσεις. Επίσης, τα συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν σε χειροκίνητες ή ρομποτικές διαμορφώσεις ή ως σταθερά ή φορητά συστήματα. Εν τούτοις, τα κύρια στοιχεία οποιουδήποτε συστήματος CGDS περιλαμβάνουν: πηγή συμπιεσμένου αερίου, θερμαντήρα αερίου, τροφοδότη σκόνης, συγκρότημα πυροβόλου ψεκασμού αποτελούμενο από προθάλαμο και υπερηχητικό ακροφύσιο, θάλαμο ψεκασμού με σύστημα κίνησης και σύστημα παρακολούθησης και τον έλεγχο των παραμέτρων ψεκασμού.

Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ταχύτητα πρόσκρουσης σωματιδίων, τα σωματίδια σκόνης τροφοδοσίας εγχέονται σε μια υπερηχητική ροή αερίου που εξασφαλίζει τη σωστή μεταφορά ορμής στα σωματίδια. Λόγω των αεροδυναμικών ιδιοτήτων τους, προτιμώνται τα αδρανή αέρια όπως το ήλιο (He) και το άζωτο (N<sub>2</sub>) ή το μείγμα τους ως προωθητικά αέρια, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό προωθητικό υλικό ξηρός αέρας (79% N<sub>2</sub> - 21% O<sub>2</sub>). Για να αντισταθμιστεί η ψύξη που σχετίζεται με την ταχεία διαστολή του αερίου εργασίας στο ακροφύσιο, χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας για την προθέρμανση του αερίου σε περίπου 700 οC. Διαγνωστικές θύρες για τη μέτρηση και τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της πίεσης του αερίου ενσωματώνονται στο ακροφύσιο. Ένας τροφοδότης σκόνης χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία σωματιδίων σκόνης στο ακροφύσιο και οι χρησιμοποιούμενες σκόνες τυπικά έχουν διάμετρο από 1 έως 50 μm. Συμβατικά συστήματα χειρισμού εργασίας όπως ένας χειριστής X-Y και ένας τόννος χρησιμοποιούνται για τη σάρωση της δέσμης ψεκασμού πάνω από την επιφάνεια του υποστρώματος (Karthikeyan et al., 2007).

Επιπροσθέτως, υπάρχουν σήμερα δύο διαθέσιμες στο εμπόριο παραλλαγές του συστήματος CGDS, ήτοι συστήματα χαμηλής και υψηλής πίεσης ψυχρού δυναμικού ψεκασμού αερίου (LPCGDS & HPCGDS). Οι δύο κύριες ξεκάθαρες διακρίσεις του συστήματος LPCGDS από το σύστημα HPCGDS είναι: Η χρήση αερίου χαμηλής πίεσης (5-10 bar αντί 25-30 bar) και η ακτινική έγχυση σκόνης αντί για αξονική έγχυση (Maev et al., 2008).

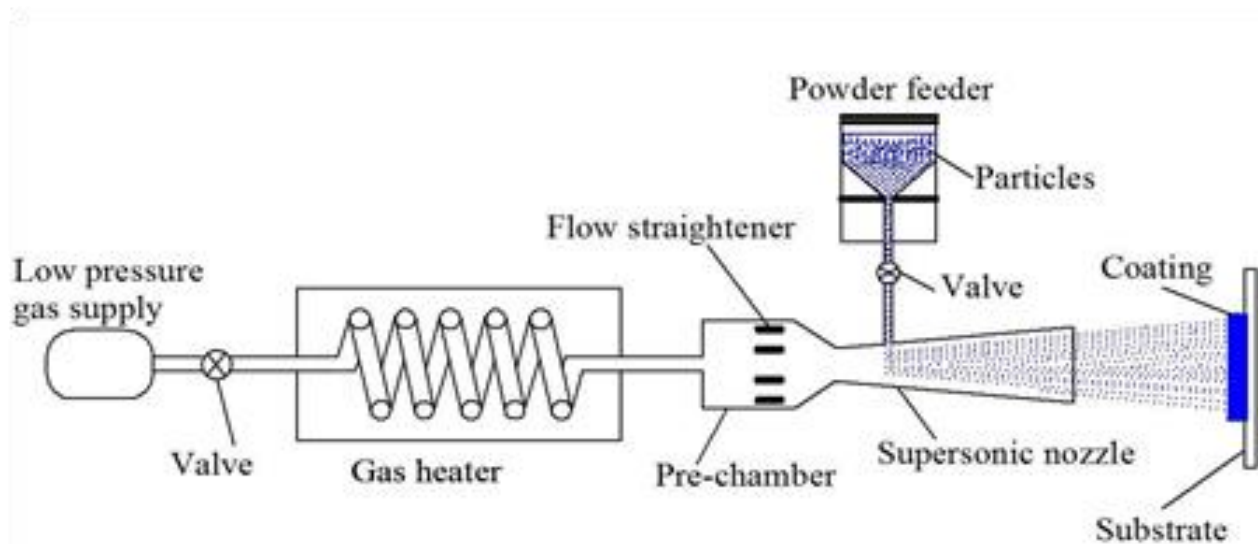
Το σχήμα 12 δείχνει ένα σχηματικό σχήμα του συστήματος LPCGDS. Το αέριο επιτάχυνσης (συνήθως αέρας ή N<sub>2</sub>) εγχέεται σε χαμηλή πίεση (5-10 bar) και προθερμαίνεται εντός του θερμαντήρα αερίου σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 400 °C για τη βελτιστοποίηση των αεροδυναμικών του ιδιοτήτων. Τα στερεά σωματίδια σκόνης εισάγονται ακτινικά κατάντη<sup>1</sup> του τμήματος του λαιμού του υπερηχητικού ακροφυσίου, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για σύστημα παροχής υψηλής πίεσης, το οποίο αυξάνει τη φορητότητα του συστήματος, την ασφάλεια λειτουργίας και μειώνει σημαντικά το κόστος ψεκασμού. Στο εσωτερικό του ακροφυσίου, η στατική πίεση διατηρείται κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση εξασφαλίζοντας ότι τα σωματίδια πρώτης ύλης τροφοδοτούνται αποτελεσματικά από τον τροφοδότη σκόνης με βάση την αρχή του Venturi (Maen et al., 2008). Αυτό επιτυγχάνεται εάν ο λόγος της επιφάνειας εγκάρσιας τομής του υπερηχητικού ακροφυσίου στο σημείο εισόδου σκόνης A<sub>i</sub> (m<sup>2</sup>) με εκείνο του λαιμού, A\* ικανοποιεί την εξίσωση 1. Στη συνέχεια, τα σωματίδια επιταχύνονται σε υπερηχητικές ταχύτητες από 300 έως 600 m / s (Kashirin et al., 2002)

$$\frac{A_i}{A^*} \geq 1.3P_0 + 0.8 \quad (1)$$

Όπου P<sub>0</sub> η πίεση του αερίου στο ακροφύσιο (MPa).

Τα σωματίδια σκόνης τροφοδοσίας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα LPCGDS περιλαμβάνουν συνήθως κεραμικά. Η πλειονότητα αυτών των κεραμικών σωματιδίων δεν παγιδεύονται εντός της επικάλυψης επειδή ψεκάζονται με ταχύτητες σωματιδίων πολύ κάτω από την κρίσιμη ταχύτητά τους. Ο ρόλος των κεραμικών είναι να δρουν ως σφυρί για την αύξηση της πυκνότητας της επίστρωσης καθώς και για τη βελτίωση της απόδοσης απόθεσης (DE). Οι αποδόσεις απόθεσης με το σύστημα αυτό συνήθως δεν υπερβαίνουν το 50% (Kreye et al., 2006).

<sup>1</sup> τα μέρη που βρίσκονται προς την κάτω πλευρά



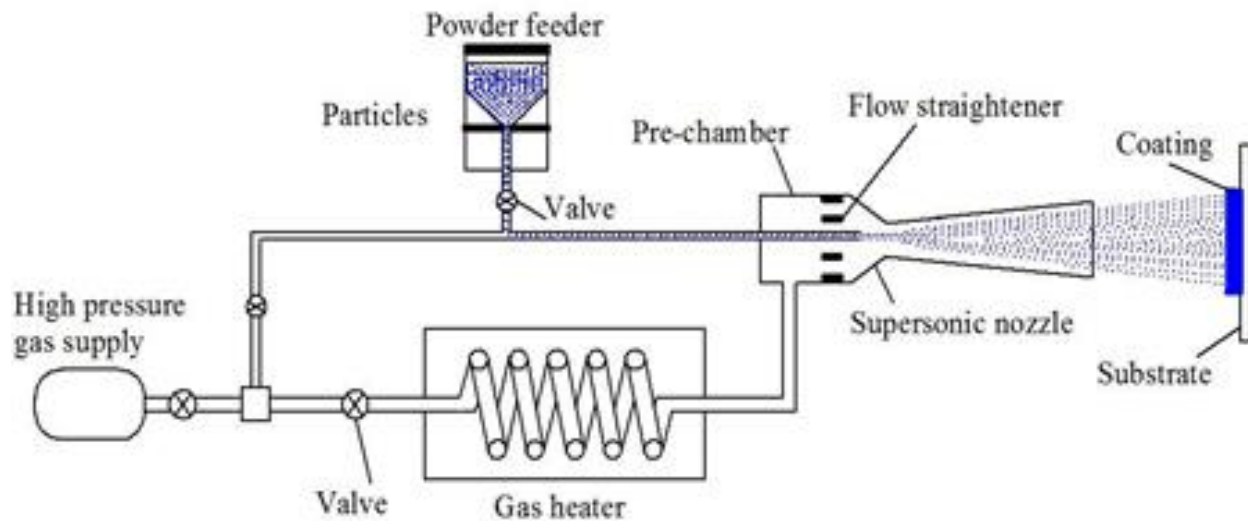
Σχήμα 12 Μια τυπική συσκευή LPCGDS (Maev et al., 2008)

Δεδομένου ότι η απόδοση ενός υπερηχητικού ακροφυσίου (συγκεκριμένα ο αριθμός Mach) καθορίζεται κυρίως από την περιοχή του λαιμού, αυτή η κατασκευή για επίστρωση ψεκασμού (σε σύγκριση με την HPCGDS) αυξάνει την λειτουργική σταθερότητα του συστήματος λόγω έλλειψης φθοράς στο στόμιο του ακροφυσίου. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς η σκόνη δεν διέρχεται από το λαιμό και ως εκ τούτου δεν προκαλεί φθορά, δεν αλλάζει τα χαρακτηριστικά του συγκροτήματος του ακροφυσίου και ως εκ τούτου δεν επηρεάζει την απόδοση του συστήματος στο σύνολό του. Η φθορά των τοιχωμάτων του ακροφυσίου συμβαίνει μόνο στο υπερηχητικό τμήμα του ακροφυσίου και, αυτό εξασφαλίζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του ακροφυσίου (Kashirin et al., 2002).

Στα συστήματα HPCGDS (Σχήμα 13), το επιταχυνόμενο αέριο (συνήθως N<sub>2</sub> ή He) εγχύεται σε υψηλή πίεση (25-30 bar) και προθερμαίνεται μέχρι 700 °C για να βελτιστοποιήσει επίσης τις αεροδυναμικές του ιδιότητες. Τα στερεά σωματίδια σκόνης στη συνέχεια εισάγονται στη ροή του αερίου προς τα ανάντη<sup>2</sup> του συγκλίνοντος τμήματος του ακροφυσίου σε μία υψηλότερη πίεση από το αέριο επιτάχυνσης για να εμποδίζεται η εκ νέου ροή του φέροντος αερίου στον τροφοδότη σκόνης. Αναμιγνύονται με το προωθητικό αέριο στη ζώνη πριν από το θάλαμο και στη συνέχεια τροφοδοτούνται αξονικά μέσα στο ακροφύσιο. Μέσα στο ακροφύσιο, τα σωματίδια επιταχύνονται

<sup>2</sup> τα μέρη που βρίσκονται προς την πάνω πλευρά

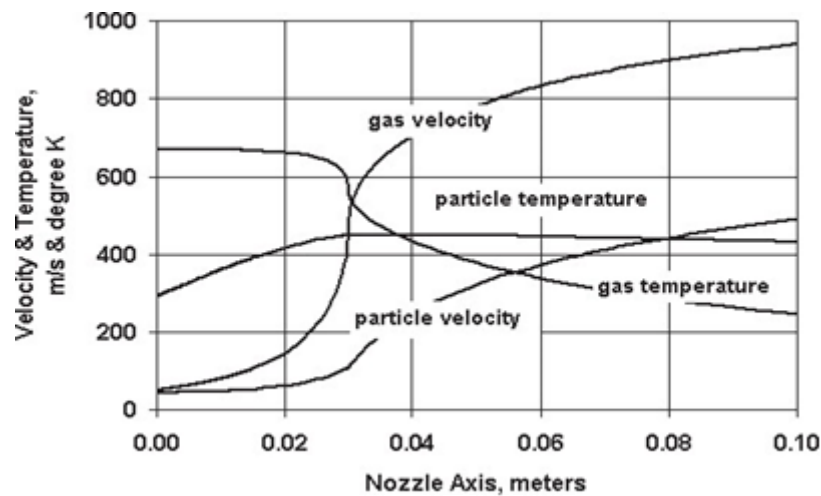
σε υπερηχητικές ταχύτητες στην περιοχή από 600 έως 1200 m / s και η απόδοση ψεκασμού είναι πολύ υψηλή, φτάνοντας μέχρι και 90% (Kreye et al., 2006).



Σχήμα 13 Μια τυπική συσκευή HPCGDS (Grujicic et al., 2004)

Η προθέρμανση του φέροντος αερίου για την αύξηση της θερμοκρασίας του και η επακόλουθη αύξηση της τοπικής ηχητικής του ταχύτητας στο λαιμό του ακροφυσίου γίνεται για να βελτιστοποιήσει απλώς τις συνθήκες αεροδυναμικής ροής του και να μην αυξήσει τη θερμοκρασία των σωματιδίων. Το αέριο στη συνέχεια μετατρέπει τη θερμοκρασία (και την πίεση) σε ταχύτητα καθώς επεκτείνεται στο ακροφύσιο. Το Σχήμα 14 δείχνει τις συνθήκες αερίου-σωματιδίου κατά τη διάρκεια της διαδρομής του ακροφυσίου (Champagne et al., 2005a). Αρχικά στην είσοδο του ακροφυσίου (0.00 m), το αέριο έχει υψηλότερη θερμοκρασία (690 ° K) από τα σωματίδια (300 οK) και συνεπώς η θερμοκρασία των σωματιδίων αυξάνεται. Εν τούτοις, καθώς το φέρον αέριο επεκτείνεται ταχέως προς τα κάτω στο αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου (λαιμός ακροφυσίου στα 0,03 m), η θερμοκρασία του μειώνεται κάτω από τη θερμοκρασία των σωματιδίων, προκαλώντας την έναρξη της μείωσης της θερμοκρασίας των σωματιδίων (Grujicic κ.ά., 2003). Επιπλέον, λόγω του γεγονότος ότι ο χρόνος επαφής των σωματιδίων ψεκασμού με το θερμό αέριο είναι αρκετά βραχύς για να προκαλέσει οποιαδήποτε σημαντική θέρμανση των σωματιδίων,

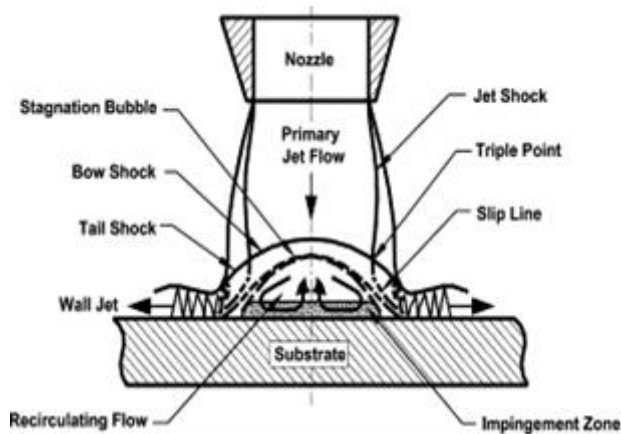
η θερμοκρασία των σωματιδίων παραμένει ουσιαστικά κάτω από την αρχική θερμοκρασία προθέρμανσης αερίου και επομένως το όνομα δυναμικό ψεκασμό αερίου



Σχήμα 14 Συνθήκες αερίων-σωματιδίων κατά τη διάρκεια της διαδρομής του ακροφυσίου (Champagne et al., 2005α)

## 2.1 Η δομή τριπλής κρούσης

Μια σχηματική απεικόνιση του πεδίου ροής του υπερηχητικού εκτοξευόμενου πίδακα παρουσιάζεται στο Σχήμα 15. Κατά την έξοδο από το ακροφύσιο, το αέριο επιτάχυνσης επιβραδύνεται καθώς η πίεση του προσπαθεί να προσαρμοστεί στην πίεση περιβάλλοντος, και η πρόσκρουση του επάνω στην επιφάνεια υποστρώματος οδηγεί στο σχηματισμό μίας περιοχής τόξου κρούσης (bow shock) (στάσιμη) μπροστά από το υπόστρωμα. Αυτό το τόξο κρούσης σχηματίζεται από τον ταχύ ρυθμό μεταβολής της ορμής του υπερηχητικού αερίου καθώς προσκρούει στο υπόστρωμα δημιουργώντας μια περιοχή υψηλής πυκνότητας, υψηλής πίεσης αερίου που κινείται με υποηχητική ταχύτητα ακτινικά προς τα έξω από την επιφάνεια. Η συνιστώσα της ταχύτητας του αερίου που είναι κάθετη στην επιφάνεια του υποστρώματος σε αυτή την περιοχή είναι αρκετά μικρή σε σχέση με τις ταχύτητες εξόδου από το ακροφύσιο και τις ταχύτητες σωματιδίων (Grujicic et al., 2004).



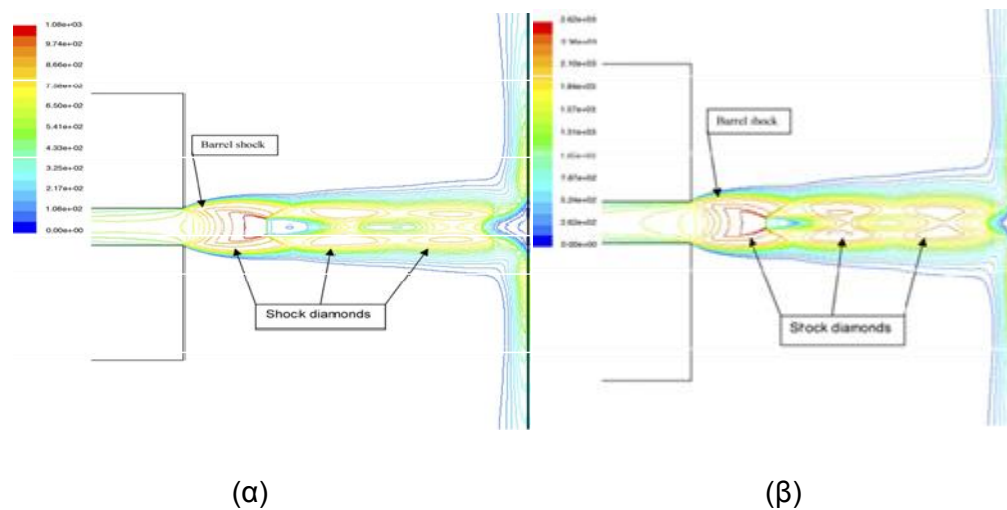
Σχήμα 15 Σχηματική παράσταση ενός υπερηχητικού πεδίου ροής πρόσκρουσης (Grujicic et al., 2004)

Το τόξο πρόσκρουσης επιβραδύνει τα σωματίδια που διέρχονται από αυτό λόγω της αντίθετης δύναμης οπισθέλκουσας και εκτρέπει τυχόν σωματίδια που δεν προσκρούουν απευθείας κάθετα με το υπόστρωμα (Novoselova et al., 2006). Εάν το αέριο δεν διογκωθεί ιδανικά, οι εκκενώσεις στο πίδακα αλληλεπιδρούν με το τόξο με αποτέλεσμα μια δομή τριπλής πρόσκρουσης, με τη τρίτη πρόσκρουση να υποδηλώνεται ως πρόσκρουση ουράς. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών προσκρούσεων ρυθμίζει το πεδίο ροής στη ζώνη πρόσκρουσης (Grujicic et al., 2004).

Το πεδίο ροής του πίδακα πρόσκρουσης διαιρείται σε τρεις κύριες περιοχές. Η πρώτη περιοχή αντιπροσωπεύει την κύρια στήλη εκτόξευσης στην οποία η ροή είναι κατά κύριο λόγο επικαλυπτική και περιέχει κύματα κρούσης επέκτασης και συμπίεσης για μη ιδανικά εκτοξευόμενους πίδακες. Η δεύτερη περιοχή (ζώνη πρόσκρουσης) περιλαμβάνει την περιοχή πρόσκρουσης του πίδακα στο υπόστρωμα και χαρακτηρίζεται από μεγάλες κλίσεις που προκαλούν σημαντικές αλλαγές στις τοπικές ιδιότητες ροής. Μία φυσαλίδα στασιμότητας που περιέχει ρευστό επανακυκλοφορίας με σχετικά χαμηλή ταχύτητα απεικονίζεται εντός της περιοχής πρόσκρουσης και η παρουσία της επηρεάζει την κατανομή της πίεσης επί της επιφάνειας του υποστρώματος. Η τρίτη περιοχή (ακτινική εκτόξευση τοιχώματος) περιλαμβάνει την περιοχή έξω από τη ζώνη πρόσκρουσης, η οποία περιέχει τη ροή του πίδακα, ανακατευθυνόμενη πλευρικά προς τα έξω μετά από πρόσκρουση (Grujicic et al., 2004).

Καθώς η υπερηχητική ροή εξέρχεται από το ακροφύσιο, σχηματίζονται διαμάντια πρόσκρουσης λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ της υπερηχητικής ροής και της ατμόσφαιρας του περιβάλλοντος. Η ρύθμιση της υπερηχητικής ροής στην ατμοσφαιρική πίεση γίνεται μέσω κυμάτων κρούσης. Αυτά είναι αρχικά είτε πλάγιες κρούσεις (κραδασμοί στα χείλη) είτε δίνες διαστολής (κρουστικό κύμα), που αντιστοιχούν σε υπερβολικά διογκωμένους ή υποπτυχθέντες

πίδακες αντίστοιχα. Καθώς τα κύματα ανακλώνται από τα άκρα του πίδακα, αλλάζουν πολικότητα, δηλαδή μια δίνη διαστολής ανακλάται ως κύμα συμπίεσης και ένα κύμα συμπίεσης ανακλάται ως δίνη διαστολής. Επομένως, και οι δύο τύποι πρόσκρουσης είναι ταυτόχρονα παρόντες. Το σχήμα 16 (α, β) απεικονίζει τις καταστάσεις ροής για το N<sub>2</sub> και το He αντίστοιχα. Το κοχλιωτό κύμα εμφανίζεται πρώτα έξω από το ακροφύσιο γιατί η στατική πίεση της ροής στην έξοδο είναι μεγαλύτερη από την πίσω πίεση, οπότε η ροή πρέπει να επεκταθεί για να φτάσει τελικά σε αυτή. Εκτός του πυρήνα του πίδακα, τα πυκνότερα περιθωριακά επίπεδα περιγράμματος υποδεικνύουν τις διατμητικές στρώσεις που αναπτύσσονται στο όριο του πίδακα. Η ροή σε αυτή την περιοχή παρασύρει το αέριο εκτός των διατμητικών στρωμάτων, επομένως, το στρώμα διάτμησης αναπτύσσεται και εισχωρεί στον πυρήνα του πίδακα (Jen et al., 2005).



Σχήμα 16 Τα περιγράμματα ταχύτητας έξω από το ακροφύσιο για το (α) N<sub>2</sub> και το (β) He (Jen et al., 2005)

Η ροή μεταξύ της εξόδου του ακροφυσίου και του κύματος κρούσης πριν από το υπόστρωμα θεωρείται ότι είναι σταθερή και ίση με τις συνθήκες στην έξοδο του ακροφυσίου. Η θέση εκτόνωσης του κύματος κρούσης σε σχέση με το υπόστρωμα δίνεται από την προσέγγιση του Billig (Helfrich et al., 2006) ως:

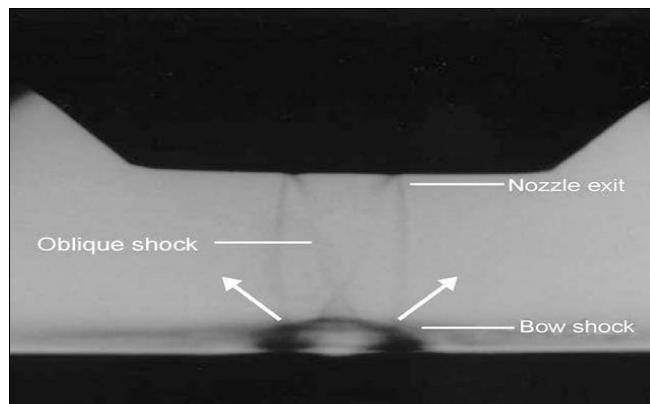
$$\Delta = 0.143 d_e e^{\frac{3.24}{M_e^2}} \quad (2)$$

Όπου  $d_e$  = διάμετρος εξόδου ακροφυσίου (m),  $M_e$  = αριθμός Mach στην έξοδο του ακροφυσίου.

Ο αριθμός Mach αμέσως πίσω από το κύμα πρόσκρουσης δίνεται από:

$$M^2 = \frac{M_e^2 + \frac{2}{\gamma - 1}}{\left(\frac{2\gamma}{\gamma - 1}\right)M_e^2 - 1} \quad (3)$$

Κατάντη του κύματος κρούσης, ο αριθμός Mach υποτίθεται ότι μειώνεται γραμμικά από την τιμή που δίνεται από την εξίσωση στο μηδέν στην επιφάνεια υποστρώματος. Όταν ο πίδακας αερίου προσκρούει επί του υποστρώματος, σχηματίζεται μία περιοχή υψηλής πίεσης ακριβώς πάνω από το υπόστρωμα, με αποτέλεσμα ένα κύμα κρούσης τόξου να αντιτίθεται στη ροή από το ακροφύσιο, (Σχήμα 17). Τα σωματίδια πρέπει να διεισδύσουν το τόξο πρόσκρουσης πριν από την πρόσκρουση στο υλικό βάσης. Ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια έχουν επαρκή ορμή για να διατηρήσουν την κρίσιμη ταχύτητα, τα μικρότερα ελαφρύτερα σωματίδια επιβραδύνονται σε σημείο όπου δεν θα υφίστανται πλέον παραμόρφωση κατά την κρούση. Το φαινόμενο του τόξου πρόσκρουσης μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας την απόσταση απόσταξης του ακροφυσίου ή παρέχοντας αυξημένη ταχύτητα στα σωματίδια. Ενώ η αύξηση της πίεσης του αερίου θα επιτύχει αυτό, υπόκειται σε σημαντικές μειούμενες αποδόσεις (Morgan et al., 2004)



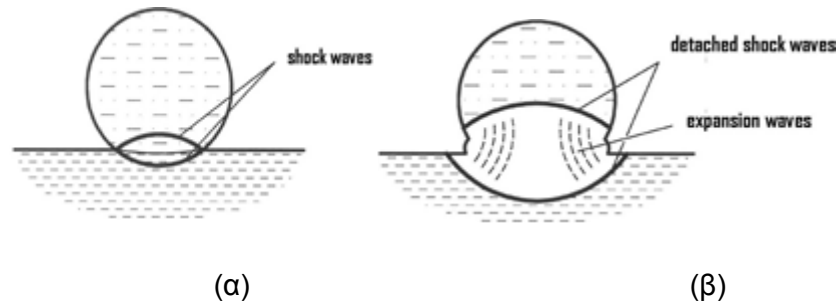
Σχήμα 17 Σχηματισμός τόξου πρόσκρουσης πάνω από το υπόστρωμα (Morgan et al., 2004)

Για όλες τις υπερηχητικές ροές που προσκρούουν σε ένα αντικείμενο, η διόρθωση ροής πραγματοποιείται από αυτό το κύμα κρούσης, το οποίο μειώνει άμεσα την ταχύτητα του αερίου σε υποηχητική και αυξάνει την πίεση και τη θερμοκρασία του. Η ταχύτητα και η θερμοκρασία των σωματιδίων δεν επηρεάζονται άμεσα από το κύμα πρόσκρουσης, αλλά εξακολουθούν να επηρεάζονται από την ταχύτητα του αερίου και τη θερμοκρασία μέσω μεταφοράς θερμότητας. Η ταχύτητα του αερίου μειώνεται γραμμικά κατάντη της πρόσκρουσης στο μηδέν στην επιφάνεια υποστρώματος. Συνεπώς, η ταχύτητα των σωματιδίων μειώνεται επίσης και είναι χαμηλότερη από εκείνη στην έξοδο του ακροφυσίου όταν χτυπά το υπόστρωμα (Helfritsch et al., 2006).



## 2.2 Μορφές κυμάτων πρόσκρουσης κατά τη πρόσκρουση

Κατά την πρόσκρουση με το υπόστρωμα, τα κύματα αρχίζουν να εξαπλώνονται από το σημείο επαφής τόσο όσον αφορά στα σωματίδια όσο και στο υπόστρωμα. Η ταχύτητα διάδοσης αυτών των κυμάτων είναι πεπερασμένη, οπότε η ζώνη της διαταραχής περιορίζεται από το περίβλημα αυτών των κυμάτων, με αποτέλεσμα το σχηματισμό δύο κυμάτων πρόσκρουσης, Σχήμα 18.



Σχήμα 18 Δημιουργία κυμάτων πρόσκρουσης και εκτόνωσης τόσο στα σωματίδια όσο και στο υπόστρωμα, και έναρξη μιας κίνησης εκτόξευσης (Klinkov et al., 2005)

Στη διαταραγμένη ζώνη μεταξύ των δύο προσκρούσεων, οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες είναι υψηλές και η περιοχή επαφής υποστρώματος / σωματιδίων αυξάνεται με το χρόνο. Αρχικά, το όριο της περιοχής επαφής κινείται προς τα έξω με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα των κρουστικών κυμάτων στα υλικά. Ως εκ τούτου, τα κύματα κρούσης παραμένουν συνδεδεμένα με το όριο ή το άκρο επαφής της περιοχής επαφής (Σχήμα 18 (α)). Όταν η ταχύτητα της ακμής επαφής μειώνεται κάτω από την ταχύτητα κρούσης, τότε τα κύματα κρούσης αποσπώνται από την ακμή επαφής (Σχήμα 18 (β)). Στη συνέχεια, η διαταραγμένη ζώνη περιορίζεται όχι μόνο από κύματα πρόσκρουσης αλλά και εν μέρει από την ελεύθερη επιφάνεια των σωμάτων. Από την ελεύθερη επιφάνεια, τα κύματα έκτασης αρχίζουν να διασκορπίζονται στη διαταραγμένη ζώνη και ταυτόχρονα σχηματίζεται ένας πίδακας υλικού που εκτοξεύεται μακριά από την επιφάνεια (Klinkov et al., 2005).

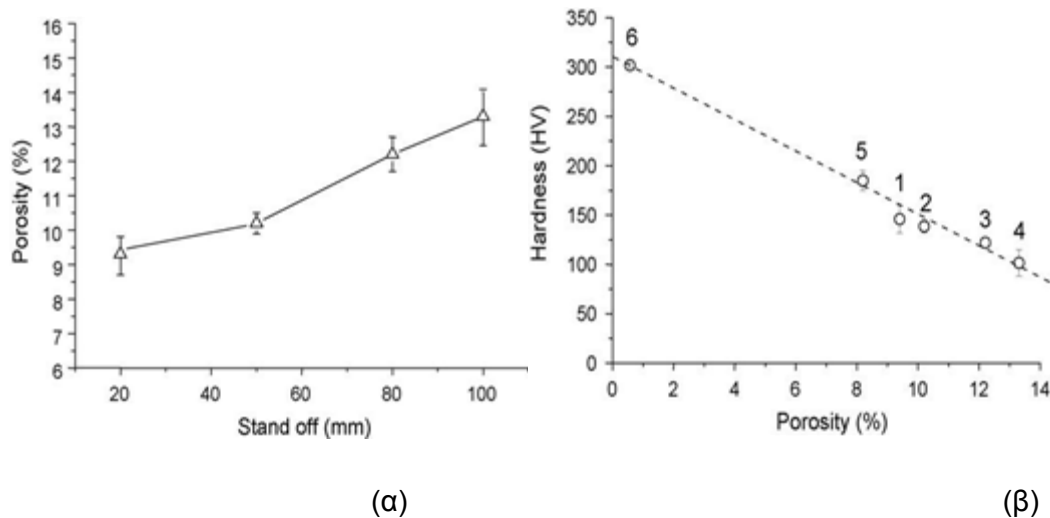
Την στιγμή της πρόσκρουσης, η πίεση πίσω από τα κύματα κρούσης,  $P_{shock}$  (MPa) δίνεται από την Εξίσωση . Αυτός ο τύπος βασίζεται σε ένα συνδυασμό ακουστικής και μη συμπίεσιμης προσέγγισης (Klinkov et al., 2005).

$$P_{shock} = \frac{1}{2} \left( \rho_p c v_p + k_s \frac{\rho_p v_p^2}{2} \right) \quad (4)$$

Όπου:  $\rho_p$  = πυκνότητα του σωματιδίου ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ),  $c$  = η ταχύτητα του ήχου στα υλικά ( $\text{m} / \text{s}$ ),  $v_p$  = ταχύτητα σωματιδίων κατά την πρόσκρουση ( $\text{m} / \text{s}$ )  $k_s$  = συντελεστής που συνδέει την ταχύτητα κύματος κρούσης με τις ταχύτητες υλικού.

Η ροή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την stand-off απόσταση ως αποτέλεσμα του τόξου πρόσκρουσης και της σχετικής ταχύτητας σωματιδίων αερίου εκτός του ακροφυσίου. Οι τρεις διακριτές περιοχές stand-off επηρεάζουν την απόδοση εναπόθεσης διαφορετικά: (1) η μικρή περιοχή stand-off όπου η δύναμη του τόξου πρόσκρουσης είναι υψηλή επηρεάζει δυσμενώς τις επιδόσεις εναπόθεσης, (2) η μεσαία περιοχή stand-off όπου το τόξο πρόσκρουσης έχει εξαφανιστεί και η ταχύτητα του αερίου παραμένει πάνω από την ταχύτητα του σωματιδίου (θετική δύναμη οπισθέλκουσας), η DE συνεχίζει να αυξάνεται. Και (3) η μεγάλη περιοχή stand-off όπου η ταχύτητα του αερίου έχει πέσει κάτω από την ταχύτητα του σωματιδίου (αρνητική δύναμη οπισθέλκουσας), και τα σωματίδια αρχίζουν να επιβραδύνουν. Για βέλτιστη απόδοση εναπόθεσης, η απόσταση stand-off πρέπει να τεθεί εντός της μεσαίας απομονωμένης περιοχής (Pattison et al., 2007a).

Η επίδραση της απόστασης απόστασης σε πορώδη επικάλυψη Ti φαίνεται στο σχήμα 19 (α). Το πορώδες είναι 14% σε απόσταση 100 mm που είναι 4,5% περισσότερο από το πορώδες 9,5% σε απόσταση 20 mm. Η μείωση οφείλεται σε μια μικρή απόσταση πτήσης για τα σωματίδια που εμποδίζει μια σημαντική μείωση της ταχύτητας των σωματιδίων που λαμβάνει χώρα σε μεγάλη απόσταση. Αυτό συμφωνεί με την ιδέα ότι η ταχύτητα των σωματιδίων είναι απαραίτητη για την επίτευξη της απαιτούμενης παραμόρφωσης που είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση του πορώδους στις εναποθέσεις CGDS. Παρ'όλα αυτά, ο σχηματισμός πορώδους 14% σε απόσταση 100 mm δείχνει ότι το CGDS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πορωδών δομών. Αυτό αξιοποιείται για εφαρμογές που απαιτούν πορώδη υλικά όπως βιο-υλικά και καταλύτες (Zahiri et al., 2009).



Σχήμα 19 Το κλάσμα όγκου πορώδους επίστρωσης Τι συναρτήσει της (α) απόστασης απόστασης και (β) της σκληρότητας (Zahiri et al., 2009)

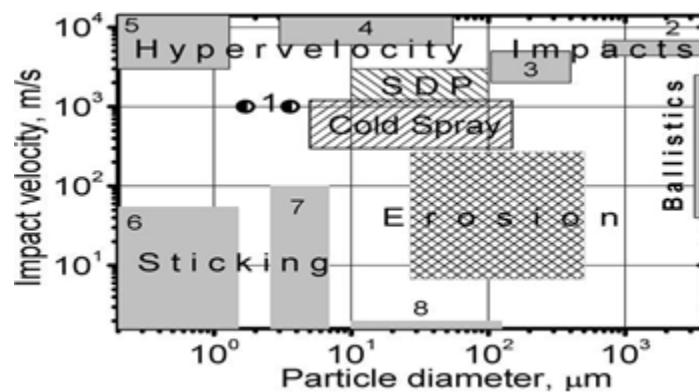
Το κλάσμα όγκου ενός πορώδους επικάλυψης Τι ως συνάρτηση της (α) απόστασης αποστάσεως και της μικροσκληρυνόμενης επικάλυψης ελέγχεται τόσο από την επίδραση σκλήρυνσης του στελέχους των εναποτιθέμενων σωματιδίων όσο και από την επίδραση της πυρολυτικής επικάλυψης των επαναλαμβανόμενων σωματιδίων, που είναι με τη σειρά τους Επηρεάζονται αρνητικά από την αύξηση της απόστασης αποστασιοποίησης. Το σχήμα 2.13 (b) απεικονίζει τις τιμές σκληρότητας της επίστρωσης ψεκασμού με ψεκασμό με ψύκτη σε συνάρτηση με το πορώδες και δείχνει ότι η μείωση του πορώδους της επικάλυψης οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας της εναπόθεσης. Για παράδειγμα, μια μείωση 13,5% σε κλάσμα όγκου πορώδους από 14 έως 0,5% οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας από 100 σε 300 HV (Zahiri et al., 2009).

Επιπλέον, με μείωση της απόστασης αποστάσεως, το πάχος της επίστρωσης αυξάνεται. Ωστόσο, σε πολύ μικρή απόσταση αποστασιοποίησης, η επιφάνεια του υποστρώματος ή η προηγούμενης εναποτιθέμενη επίστρωση εκτίθεται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία αερίου, αυξάνοντας έτσι τις πιθανότητες μόλυνσης με οξείδιο επίστρωσης. Ως εκ τούτου, σε μια διαδικασία CGDS, η επιλογή της απόστασης αποστασιοποίησης θα πρέπει να συμβιβαστεί μεταξύ υψηλής DE και χαμηλής οξειδώσεως της επικάλυψης για ευαίσθητα στη θερμοκρασία υλικά (Li W.-Y. et al., 2008).

## 2.3 Η διαδικασία της συγκόλλησης

Η εναπόθεση σωματιδίων λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια. Πρώτα λαμβάνει χώρα η εναπόθεση στο γυμνό υπόστρωμα και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η εναπόθεση νέων σωματιδίων πάνω σε προηγουμένως εναποτιθέμενα σωματίδια. Και οι δύο διαδικασίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα των σωματιδίων και τις ιδιότητες του υποστρώματος και των σωματιδίων. Όταν η δέσμη αερίων με φορτίο σωματιδίων προσκρούει σε ένα υπόστρωμα, ανάλογα με την ταχύτητα σωματιδίων ( $v_p$ ) συμβαίνουν τρία διαφορετικά φαινόμενα. Όταν η  $v_p$  είναι χαμηλή, τα σωματίδια αναπηδούν ή ανακλώνται από την επιφάνεια. Όταν η  $v_p$  φθάνει σε μέτριες τιμές, λαμβάνει χώρα διάβρωση του υποστρώματος παρόμοια με την αμμοβολή. Όταν η  $v_p$  υπερβαίνει το  $v_{crit}$  που απαιτείται για να επιτευχθεί εναπόθεση, τα σωματίδια παραμορφώνονται πλαστικά και διεισδύουν στο υπόστρωμα και μεταξύ τους σχηματίζουν μια πυκνή συγκολλητική επικάλυψη (Karthikeyan et al., 2007).

Συχνά, η πρόσκρουση σωματιδίων σε μια επιφάνεια προκαλεί παραμόρφωση ή καταστροφή τόσο των σωματιδίων όσο και του στερεού σώματος. Οι περιοχές που χαρακτηρίζουν ορισμένα φαινόμενα πρόσκρουσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 20. Οι επιπτώσεις των μικρών όγκιμων σωματιδίων στις επιφάνειες των όγκιμων και εύθραυστων υλικών σε ταχύτητες περίπου 300-1200 m / s αντιστοιχούν στην περιοχή που χαρακτηρίζεται ως κρίσιμος ψεκασμός (Klinkon et al., 2005).

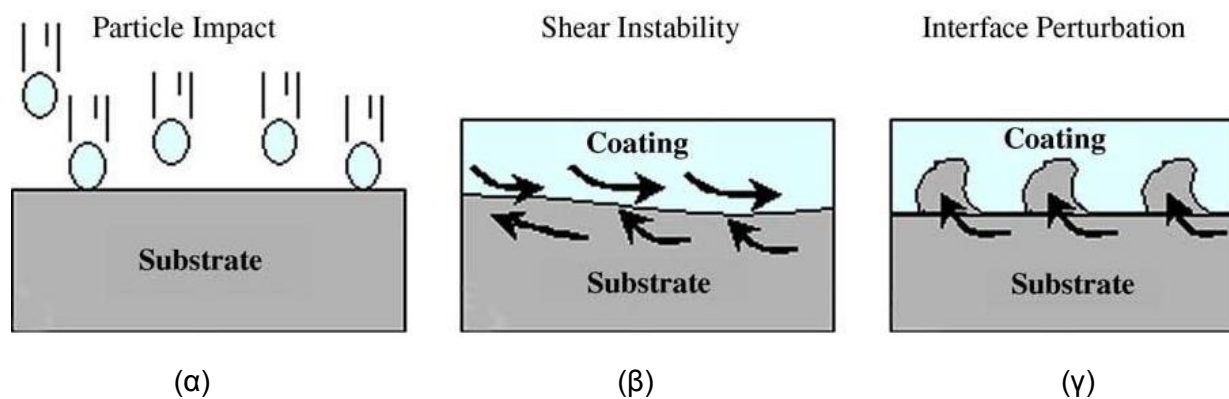


Σχήμα 20 Περιοχές χαρακτηριστικών φαινομένων πρόσκρουσης (Klinkon et al., 2005)

Επιπλέον, οι συνθήκες κρούσης δεν προκαλούν αμέσως απόθεση σωματιδίων. Η απόθεση παρατηρείται μόνο αφού η επιφάνεια έχει εκτεθεί σε επιπτώσεις σωματιδίων για ορισμένο χρόνο και η διαδικασία έχει ενεργοποιηθεί. Αυτός ο χρόνος «επώασης» είναι συνάρτηση της ταχύτητας πρόσκρουσης, μειούμενος με την αύξηση τόσο της ταχύτητας κρούσης όσο και του ρυθμού ροής σωματιδίων στη ροή του αερίου. Ωστόσο, επαρκώς γρήγορα σωματίδια συνδέονται με μη ενεργοποιημένες επιφάνειες (Klinkon et al., 2005).

Η μηχανική συγκόλληση στο CGDS εξηγείται στο Σχήμα 21 (Balani et al., 2005a). Κατά την πρόσκρουση με το υπόστρωμα υπό υψηλή τοπική πίεση, (Σχήμα 21 (α)) τα στερεά σωματίδια υφίστανται πλαστική παραμόρφωση που προκύπτει από τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του σωματιδίου σε θερμότητα και ενέργεια καταπόνησης. Αυτή η διαδικασία παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση λεπτών επιφανειακών φιλμ (οξειδίων) στα σωματίδια και στο υπόστρωμα (Ajdelstajn et al., 2006), εκθέτοντας τις καθαρές επιφάνειες τους. Οι διεπιφανειακοί πίδακες σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης και οδηγούν τα ραγισμένα οξείδια στις άκρες της ράβδου και τα εξατμίζουν από το σημείο συγκόλλησης.

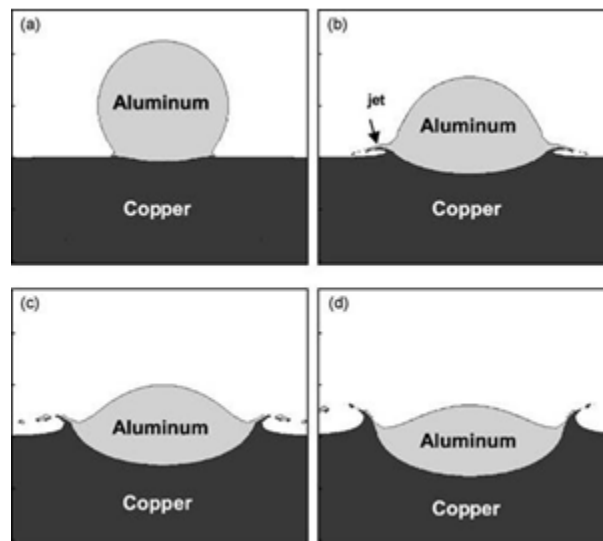
Η εντατική παραμόρφωση των σωματιδίων και του υποστρώματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας στις εντοπισμένες περιοχές επαφής. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται από αδιαβατικές διατμητικές αστάθειες κατά την εναπόθεση (Σχήμα 21 (β)) και οδηγεί σε θερμικό μαλάκωμα των ψεκασμένων υλικών. Τα υλικά χάνουν την αντοχή τους σε διάτμηση και η αντοχή τους στη ροή διατμήσεως είναι γενικά χαμηλή, και συνεπώς υφίσταται υπερβολική παραμόρφωση για οποιαδήποτε ποσότητα επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης (Assadi et al., 2003). Οι διεπιφανειακές αστάθειες στη συνέχεια σχηματίζονται κατά μήκος της διασύνδεσης υποστρώματος / σωματιδίου οδηγεί στο σχηματισμό διεπιφανειακών κυλίνδρων και στροβίλων (Σχήμα 21 (γ)). Αυτές οι συστοιχίες και οι δίνες είναι υπεύθυνες για τη μηχανική συγκόλληση μεταξύ του καθαρού υποστρώματος και των σωματιδίων στη διεπαφή υποστρώματος / σωματιδίων (Ajdelstajn et al., 2006).



Σχήμα 21 Σχηματική διασύνδεση της διαδικασίας συγκόλλησης σωματιδίου / υποστρώματος. (α) σωματίδια προσκρούουν στο υπόστρωμα, (β) διαφορετικές ταχύτητες ροής κατά μήκος της διασύνδεσης, (γ) δημιουργία ζευκτών διασυνδέσεων και δίνης (Balani et al., 2005a)

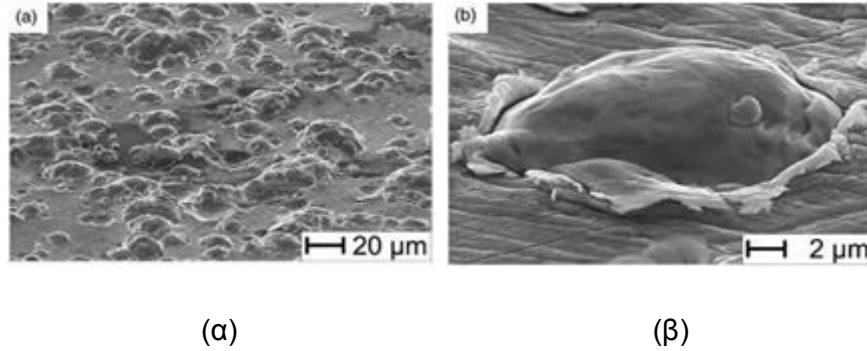
Το σχήμα 22 δείχνει την σύγκρουση μεταξύ ενός σωματιδίου Al και ενός υποστρώματος Cu σε τέσσερις χρονικές στιγμές: 5, 20, 35 και 50 ns αντίστοιχα. Καθώς ο χρόνος επαφής σωματιδίου / υποστρώματος αυξάνεται, ο λόγος διαστάσεων σωματιδίου (ύψος προς πλάτος) μειώνεται ενώ

το βάθος και το πλάτος του κρατήρα υποστρώματος αυξάνονται. Ταυτοχρόνως, σχηματίζεται μία διεπιφανειακή δέσμη αποτελούμενη τόσο από το σωματιδιακό υλικό όσο και από το υλικό υποστρώματος στην επιφάνεια επαφής σωματιδίου / υποστρώματος. Όταν αυτή η δέσμη φτάσει στην ελεύθερη επιφάνεια, σχηματίζει ένα χείλος το οποίο δείχνει μακριά από το πεπλατυσμένο σωματίδιο. Ο σχηματισμός τέτοιων πιδάκων και ο ρόλος τους στην απομάκρυνση του μολυσμένου υλικού από τις επιφάνειες των σωματιδίων και του υποστρώματος είναι μια σημαντική (απαραίτητη) κατάσταση που ελέγχει την αντοχή της δέσμευσης σωματιδίων / υποστρωμάτων (Grujicic et al., 2003)



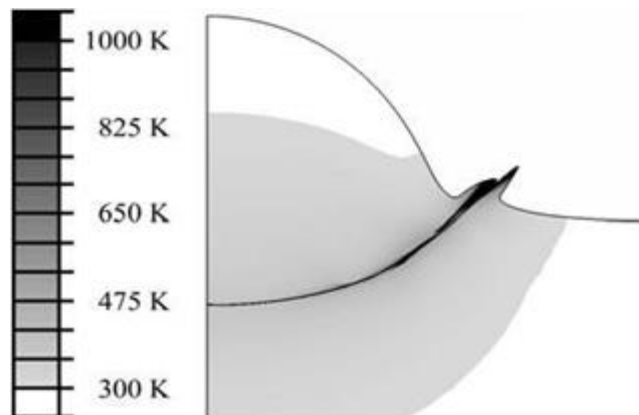
Σχήμα 22 Η εξέλιξη των σχημάτων ενός σωματιδίου σκόνης τροφοδοσίας Al και ενός υποστρώματος Cu στις χρονικές στιγμές: (α) 5 ns, (β) 20 ns, (γ) 35 ns και (δ) 50 ns (Grujicic κ.ά., 2003)

Το σχήμα 23 παρουσιάζει μικρογραφίες σωματιδίων Cu μετά από πρόσκρουση σε ένα υπόστρωμα Cu. Οι εικόνες σε χαμηλές μεγεθύνσεις, (Σχήμα 23 (α)) καταδεικνύουν ότι περισσότερο από το 80% των σωματιδίων που προσκρούουν προσκολλώνται στο υπόστρωμα. Η κοντινή όψη στο Σχήμα 23 (β) απεικονίζει όψη μιας μοναδικής πρόσκρουσης ενός σωματιδίου Cu επί ενός επίπεδου υποστρώματος Cu, επιδεικνύοντας την εντοπισμένη, πιο ιξώδη ροή υλικού, με αποτέλεσμα των ενοποιημένο πίδακα υλικού στο εξωτερικό χείλος του κρατήρα πρόσκρουσης. Οι μικρογραφίες δείχνουν επίσης ότι η παραμόρφωση των δευτερογενών σωματιδίων επηρεάζεται από τη μορφολογία που δημιουργείται από πρωτογενείς επιπτώσεις (Assadi et al., 2003).



Σχήμα 23 SEM δειγμάτων δοκιμής πρόσκρουσης σωματιδίων Cu σε ένα υπόστρωμα Cu, που δείχνει (α) μια επισκόπηση και (β) μια κοντινή εικόνα (Assadi et al., 2003)

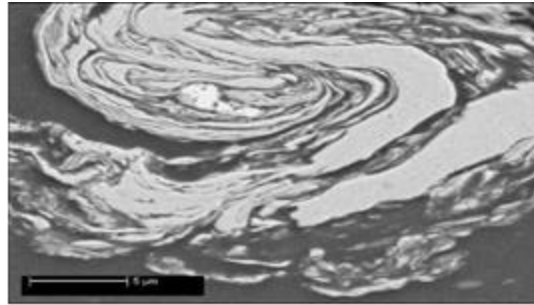
Στο σχήμα 24 εμφανίζεται το πεδίο θερμοκρασίας που λαμβάνεται 15 ns μετά την αρχική επαφή ενός σωματιδίου Cu που προσκρούει με ταχύτητα 500 m / s σε ένα υπόστρωμα Cu. Η παραμόρφωση και η θέρμανση του σωματιδίου και του υποστρώματος είναι υψηλότερη στην περιοχή διεπαφής και μειώνεται με αυξανόμενη απόσταση. Οι εξαιρετικά ομοιόμορφες συνθήκες τάσης και συνεπώς οι κατανομές της θερμοκρασίας έχουν σαν αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά που μοιάζουν με τζετ εκτός από το σωματίδιο που προσκρούει (Gärtner et al., 2006a).



Σχήμα 24 Κατανομή θερμοκρασίας στη διεπαφή σωματιδίου-υποστρώματος για ένα σωματίδιο Cu που προσκρούει σε ένα υπόστρωμα Cu (Gärtner et al., 2006a)

Οι διεπιφανειακές αστάθειες συμβαίνουν όταν δύο ρευστά σε επαφή κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες σε μια κατεύθυνση παράλληλη με τη διεπαφή τους και η διεπαφή υπόκειται σε διαταραχή ή καμπυλότητα. Καθώς ένα ρευστό ρέει γύρω από το άλλο, παράγεται μια φυγόκεντρη δύναμη. Μία αλλαγή πίεσης παρατηρείται και προάγει την ενίσχυση της διεπιφανειακής διατάραξης. Το Σχήμα 25 είναι μια εικόνα με οπίσθια απεικόνιση που απεικονίζει αστάθειες

διασύνδεσης σκόνης Νί ψυχρής ψεκασμού επί ενός υποστρώματος Al. Η φωτεινή περιοχή είναι Νί και η σκοτεινότερη περιοχή είναι το υπόστρωμα Al (Ajdelstajn et al., 2005).



Σχήμα 25 Σάρωση εικόνας αστάθειας διεπαφής κρύου ψεκασμένης σκόνης Νί σε ένα υπόστρωμα Al (Ajdelstajn et al., 2005)

Αφού έχει σχηματιστεί μια επικάλυψη υποστρώματος / σωματιδίων, τότε λαμβάνει χώρα μια εντοπισμένη διαδικασία παραμόρφωσης μεταξύ των ερχόμενων και των ήδη εναποτιθέμενων σωματιδίων. Η εντοπισμένη αδιαβατική διατμητική αστάθεια που δημιουργείται στα όρια των σωματιδίων προάγει μια στενή σύμμορφη επαφή (μεταλλική σύνδεση) μεταξύ των γειτονικών επιφανειών καθαρών σωματιδίων και επιτρέπει την ταχεία δημιουργία στρώσεων αποτιθέμενου υλικού (Ajdelstajn et al., 2006).

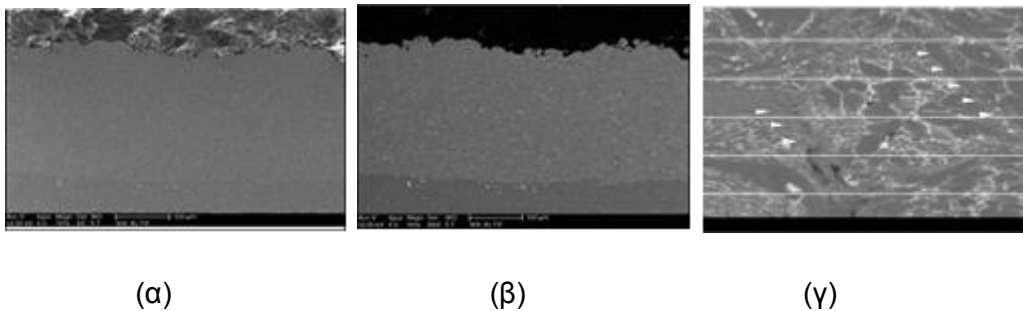
Λόγω πολύ σύντομων χρόνων επαφής σωματιδίων/υποστρώματος και σωματιδίων/σωματιδίων (~ 10<sup>-8</sup> δευτερόλεπτα), η θερμική αγωγιμότητα και η ατομική διάχυση δεν θεωρείται ότι παίζουν κάποιο ρόλο στη σύνδεση CGDS. Στις διεργασίες TS όπου η ατομική διάχυση είναι υπεύθυνη για τη σύνδεση, η απόσταση θερμικής διάχυσης είναι μόνο ένα κλάσμα της διασωματικής απόστασης που λαμβάνεται στο CGDS, εξαιτίας της οποίας η ατομική διάχυση αποκλείεται ως μηχανισμός σύνδεσης υπό συνθήκες απόθεσης CGDS (Grujicic et al., 2004), επιβεβαιώνοντας ότι η διαδικασία CGDS είναι αδιαβατική (η μεταφορά θερμότητας είναι δεν εξετάζεται).

Η θεωρία ότι η συγκόλληση CGDS λαμβάνει χώρα με πλαστική παραμόρφωση υποστηρίζεται από μια σειρά πειραματικών ευρημάτων όπως: (α) ένα ευρύ φάσμα όγκιμων (μεταλλικών και πολυμερών) υλικών μπορεί να ψεκάζεται με επιτυχία εν ψυχρώ, ενώ μπορούν να αποτεθούν μη-εύπλαστα υλικά όπως κεραμικά μόνο αν χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα με ένα όγκιμο υλικό (μήτρα) (β) η μέση ταχύτητα σωματιδίων εναπόθεσης πρέπει να υπερβαίνει μια ορισμένη ελάχιστη (εξαρτώμενη από το υλικό) κρίσιμη ταχύτητα για να επιτευχθεί απόθεση η οποία υποδηλώνει ότι πρέπει να είναι διαθέσιμη επαρκής κινητική ενέργεια για να παραμορφώσει πλαστικά το στερεό υλικό και να διαταράξει τις ταινίες επιφανείας (οξειδίου). Και (γ) η κινητική ενέργεια του σωματιδίου κατά την κρούση είναι σημαντικά χαμηλότερη από την ενέργεια που



απαιτείται για την τήξη του σωματιδίου υποδεικνύοντας ότι ο μηχανισμός εναπόθεσης είναι εξ ολοκλήρου μια διεργασία στερεάς κατάστασης (Grujicic et al., 2004).

Το σχήμα 26 (α, β) δείχνει εικόνες ψεκασμού με Al. Η έλλειψη ελαττωμάτων και πορώδους (ως εκ τούτου μια καλή ποιότητα επικάλυψης) στις διασυνδέσεις σωματιδίου / σωματιδίου και σωματιδίου / υποστρώματος υποδεικνύει επαρκή κινητική ενέργεια κατά την εναπόθεση για να σπάσει τα φιλμ επιφανείας (οξειδίου) και να δημιουργήσει στενή σύνδεση στις διεπαφές. Περαιτέρω, το Σχήμα 26 (γ) δείχνει ενδείξεις συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης (παραμορφωμένος κόκκος μέσα στα σωματίδια) και έντονης τοπικής διάτμησης στα όρια σωματιδίων / σωματιδίων στην επίστρωση που υποδεικνύεται με βέλη.



Σχήμα 26 Επίστρωση αλουμινίου με ψεκασμό Al: (α) δευτερογενής εικόνα ηλ. μικροσκοπίου, (β) εικόνα ηλ. μικροσκοπίου με αντίστροφη διάσπαση και (γ) οι αστάθεις διάτμησης στα όρια των σωματιδίων / σωματιδίων και οι βαριά παραμορφωμένες μικροδομές στο εσωτερικό των σωματιδίων (Ajdelsztajn et al.)

Μια βαριά παραμόρφωση των σωματιδίων είναι προφανής αφού δεν διατηρούν τα αρχικά τους σχήματα αλλά είναι μάλλον πεπλατυσμένα, κυρίως παράλληλα με το υπόστρωμα. Αυτή η εξαιρετικά παραμορφωμένη μικροδομή στις επικαλύψεις επιβεβαιώνει ότι η πλαστική παραμόρφωση και η αλληλοσύνδεση των ριπών (κάθε σωματίδιο διαμορφώνεται σύμφωνα με το προηγούμενο στρώμα) είναι ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για τη σύνδεση στο CGDS (Ajdelsztajn et al., 2006).

Η φύση και η έκταση της παραμόρφωσης των σωματιδίων κατά την κρούση εξαρτώνται από τον αριθμό ζημιών (μια αδιάστατη ομάδα). Αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει τον λόγο μεταξύ δυνάμεων αδρανείας και δυνάμεως στην κρίσιμη ταχύτητα. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή, τόσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της πλαστικής παραμόρφωσης που απαιτείται για την επίτευξη της σύνδεσης (Xu et al., 2006). Η ανεπαρκής παραμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο πορώδες το οποίο στη συνέχεια έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του αποτιθέμενου υλικού (Zahiri et al, 2009).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ COLD SPRAY

Η πρώτη ύλη σε κάθε επεξεργασία ψεκασμού είναι πολύ σημαντική καθώς η ποιότητα της επικάλυψης εξαρτάται από την ποιότητα των υλικών τροφοδοσίας. Μια επίστρωση με cold spray χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων που σχετίζονται με την εφαρμογή της, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμομόνωση, η αντοχή στη διάβρωση, η αντοχή στην οξείδωση, η αντίσταση στη φθορά κλπ. Όλες αυτές οι παράμετροι συνδέονται εγγενώς με την αρχική σκόνη και Παράμετροι ψύξης ψύχους που χρησιμοποιούνται για την εναπόθεση των επικαλύψεων. Σε αντίθεση με τον θερμικό ψεκασμό, όπου το υλικό τροφοδοσίας μεταβάλλεται χημικά σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια του ψεκασμού, ο ψυχρός ψεκασμός τείνει να διατηρεί τα χαρακτηριστικά της σκόνης τροφοδοσίας στη διαδικασία επίστρωσης. Αυτό κάνει την επιλογή των πρώτων υλών κρίσιμο παράγοντα για την εναπόθεση επικαλύψεων ψεκασμού εν ψυχρώ.

Η βιομηχανία παρασκευής σκόνης κινείται όλο και περισσότερο προς την κατεύθυνση της υψηλότερης καθαρότητας, της στενότερης κοπής των μεγεθών των σωματιδίων σκόνης και των μορφολογιών σκόνης κατάλληλων για ψυχρό ψεκασμό. Στις αρχές του εικοστού πρώτου αιώνα, κατά το αρχικό στάδιο ανάπτυξης του κρύου ψεκασμού, η πρώτη ύλη σκόνης που χρησιμοποιήθηκε σε κρύο ψεκασμό ήταν πολύ περιορισμένη, καθώς οι περισσότερες σκόνες κατασκευάστηκαν για βιομηχανίες θερμικού ψεκασμού και μεταλλουργίας σκόνης. Με την εισαγωγή εμπορικού ψυκτικού εξοπλισμού ψεκασμού, η βιομηχανία παραγωγής σκόνης μετανάστευσε προς την παραγωγή περιοχών μεγέθους κόνεως και συνθέσεων κατάλληλων για ψυχρό ψεκασμό. Τυπικά, ο ψυχρός ψεκασμός απαιτεί μια πρώτη ύλη που έχει μια στενή κατανομή μεγέθους και λεπτότερη από την τυπική πρώτη ύλη θερμικού ψεκασμού, οι λόγοι πίσω από τους οποίους εξηγούνται αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο. Τα απαιτούμενα κλάσματα μεγέθους σωματιδίων είναι ειδικά για κάθε διαφορετικό σχεδιασμό του εξοπλισμού ψεκασμού (Champagne 2007). Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κλάσματα μεγέθους σωματιδίων κυμαίνονται από 5-25 και 15-45 μm. Αυτό είναι τυπικά το μικρότερο άκρο των μεγεθών μεγέθους κόνεων που κατασκευάζονται από τους εμπορικούς κατασκευαστές σκόνης. Η τιμή των σκονών είναι συνάρτηση των μεγεθών σωματιδίων και των μορφολογικών προδιαγραφών.

Το υλικό της πρώτης ύλης θεωρείται ουσιαστικό μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού επίστρωσης που περιλαμβάνει τις ιδιότητες των υποστρωμάτων και του ενδιάμεσου στρώματος (στην περίπτωση πολυμερών, σύνθετων υλικών κλπ.). Οι ιδιότητες των υλικών τροφοδοσίας

ποικίλλουν ανάλογα με τις οδούς παρασκευής. Ορισμένες καθιερωμένες τεχνικές όπως ο ψεκασμός, η μηχανική κράμανση, η πυροσυσσωμάτωση και η ξήρανση με ψεκασμό χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για την παραγωγή πρώτης ύλης για ψυχρό ψεκασμό. Το κεφάλαιο περιγράφει τις ιδιότητες των υλικών τροφοδοσίας και τις οδούς παραγωγής που.

### 3.1 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά πρώτης ύλης

Υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά των σκονών που μπορούν να τις καταστήσουν κατάλληλες ή ακατάλληλες για τροφοδοσία και ψυχρό ψεκασμό. Οι ιδιότητες του υλικού τροφοδοσίας επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των επικαλύψεων που προκύπτουν. Μια θεμελιώδης απαίτηση του τροφοδότη σκόνης στη διαδικασία ψεκασμού είναι η μεταφορά της σκόνης προς την ανάντη ή προς τα κατόντη του συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου όπου τα σωματίδια σκόνης επιταχύνονται προς τα υποστρώματα. Η ρευστότητα της σκόνης, ή όπως είναι γνωστή στον κλάδο ως το «πρόβλημα τροφοδοσίας σκόνης», είναι μια πτυχή σχετιζόμενη με την ικανότητα ψεκασμού της σκόνης (Davis 2004). Η ρευστότητα της σκόνης είναι το πρώτο κριτήριο στην επιλογή ενός υλικού πρώτης ύλης για ψυχρό ψεκασμό. Προβλήματα τροφοδοσίας ή απόφραξη των ακροφυσίων στο λαιμό μπορούν να προκαλέσουν διακεκομμένες διαδρομές ψεκασμού και επιστρώσεις χαμηλής ποιότητας. Μία ποσοτική μέθοδος δοκιμής για τη μέτρηση της ρευστότητας της σκόνης είναι η ASTM B213 με τη χρήση χοάνης ροής του Hall (Davis 2004). Ο μετρητής ροής Hall είναι μια απλή συσκευή που καθορίζει τον ρυθμό ροής των μεταλλικών και λεπτών σκονών ελεύθερης ροής χρησιμοποιώντας μια προ-βαθμονομημένη χοάνη. Ο μετρητής ροής Hall προσδιορίζει επίσης την φαινόμενη πυκνότητα της σκόνης δοκιμής σύμφωνα με την ASTM B212 (Pawlowski 2008). Ο ρυθμός ροής της σκόνης είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό, το οποίο καθορίζει τη σκοπιμότητα της σκόνης για τη διαδικασία ψεκασμού ψεκασμού. Ο ρυθμός ροής που είναι πολύ υψηλός θα συσσωρευτεί στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου και θα κλείσει το λαιμό. Εναλλακτικά, χαμηλή ρευστότητα θα έχει ως αποτέλεσμα την διακοπτόμενη τροφοδοσία και τις ασυνεπείς ιδιότητες επικάλυψης.

Οι ιδιότητες της σκόνης τροφοδοσίας μπορούν ευρέως να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά. Τα φυσικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- Μέγεθος σωματιδίων και μεγέθη κόκκων
- Εξωτερική μορφολογία (σφαιρική, σφαιρική, γωνιακή) καθώς και εσωτερική μορφολογία (πορώδες)
- Θερμοκρασία και φαινόμενη πυκνότητα

- Θερμικές ιδιότητες
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα / αντίσταση

Και, οι χαρακτηριστικές χημικές ιδιότητες των σκονών περιλαμβάνουν:

- Χημική σύνθεση (καθαρότητα, επίπεδο ανεπιθύμητων ειδών όπως οξυγόνο, επίπεδα αζώτου)
- Κατανομή των ιζημάτων και των φάσεων
- κρυσταλλογραφικές πληροφορίες (στερεές λύσεις)

Είναι επιθυμητό να υπάρχουν σκόνες με καλή ρευστότητα και απαλλαγμένες από δορυφορικά σωματίδια. Τα δορυφορικά σωματίδια είναι λεπτά σωματίδια που κολλάνε στα μεγαλύτερα σωματίδια και προκαλούν προβλήματα συσσώρευσης και τροφοδότησης.

### 3.1.1 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων

Το μέγεθος σωματιδίων σκόνης σε μια παρτίδα σκόνης ορίζεται από το ανώτερο και κατώτερο όριο της κατανομής μεγέθους σκόνης. Τα μεγέθη των σωματιδίων μετριοούνται με τη χρήση αναλυτή μεγέθους σωματιδίων με διάγραμμα λέιζερ (όπως Malvern 3000, Malvern, UK) η οποία παράγει κατανομή μεγέθους όλων των μετρούμενων μεγεθών. Μια καλή κατανομή μεγέθους σκόνης είναι κανονικά κατανεμημένη (Gaussian) και δεν είναι λοξή, πράγμα που σημαίνει ότι η διαφορά μεταξύ του 50<sup>ου</sup> εκατοστημορίου και του μέσου μεγέθους σωματιδίων δεν είναι σημαντική (Crawmer 2004). Στην πραγματικότητα, κάποια παραμόρφωση είναι αναπόφευκτη στην κατανομή μεγέθους σκόνης. Τα μεγέθη σκόνης τυπικά καθορίζονται από το 90<sup>ο</sup> και το 10<sup>ο</sup> εκατοστημόριο της κατανομής. Μια τυπική σκόνη Cu για κρύο ψεκάσμο έχει εύρος μεγέθους +5 - 25 μm, που σημαίνει ότι το 10% της σκόνης είναι κάτω από 5 μm και το 10% της σκόνης είναι πάνω από 25 μm. Η ταξινόμηση είναι η τεχνική για το διαχωρισμό των σκονών σε διαφορετικές κλίμακες μεγέθους μετά τα στάδια της παραγωγής. Η ταξινόμηση αέρα χρησιμοποιείται συνήθως για μεγέθη μικρότερα από 45 μm καθώς οι οθόνες / κόσκινα δεν είναι πρακτικές.

### 3.1.2 Μορφολογία σωματιδίων

Η μορφολογία ή το σχήμα των σωματιδίων είναι συνάρτηση της οδού παραγωγής της σκόνης. Η μορφολογία της σκόνης επηρεάζει τη ρευστότητα, την φαινόμενη πυκνότητα, την ψυχρή ψεκασμό και τελικά το πορώδες της επίστρωσης και την αποδοτικότητα απόθεσης (DE). Γενικά, σωματίδια ανώμαλου σχήματος δεν τροφοδοτούνται τόσο εύκολα όσο τα σφαιρικά σωματίδια καθώς τα ακανόνιστα σωματίδια συσσωρεύονται (Berndt 2004a). Τα σωματίδια σε ατμόσφαιρα αερίου είναι σφαιρικά και επομένως έχουν καλύτερη ικανότητα ροής.

Η μορφολογία της σκόνης πρέπει να διερευνηθεί για τον προσδιορισμό της οδού παρασκευής της πρώτης ύλης. Επιπλέον, εξωτερικά χαρακτηριστικά, όπως δορυφορικά σωματίδια, μπορούν επίσης να έχουν εσωτερικά πορώδη. Η εξωτερική μορφολογία της σκόνης μπορεί να εξεταστεί απευθείας χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και η εσωτερική μορφολογία και το πορώδες μπορούν να εξεταστούν μέσω ενός μεταλλογραφικού παρασκευάσματος διατομών σε σκόνη. Οι σκόνες μπορούν να ενθυλακωθούν στη ρητίνη και να παρασκευαστούν χρησιμοποιώντας άλεση και στίλβωση για παρατηρήσεις μικροδομής.

### 3.1.3 Χημική καθαρότητα

Οι σκόνες που χρησιμοποιούνται στον ψυχρό ψεκασμό είναι υψηλότερης καθαρότητας από αυτές που τυπικά χρησιμοποιούνται για θερμικό ψεκασμό. Τα υλικά βαθμολογούνται σύμφωνα με διάφορα επίπεδα προσμείξεων ( $O_2$ ,  $N_2$ ) σε αυτά, τα οποία επίσης επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Η συγκόλληση στον ψυχρό ψεκασμό θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα της διάσπασης των οξειδίων των περιβλημάτων που περιβάλλουν τα υλικά και συνεπώς το υψηλότερο επίπεδο οξυγόνου μπορεί να δυσχεράνει τη συγκόλληση. Τα επίπεδα ακαθαρσιών στη σκόνη εξαρτώνται από τις οδούς παρασκευής και την αποθήκευση σκόνης.

Η απορροφημένη υγρασία στην επιφάνεια της σκόνης μπορεί να προκαλέσει σημαντικό πρόβλημα διατροφής σε σκόνη και να υποβαθμίσει τη σκόνη. Για να αφαιρεθεί η υγρασία, συνιστάται να στεγνώνει η σκόνη σε θερμαινόμενο φούρνο πάνω από  $100\text{ }^\circ\text{C}$  (σημείο ζέσεως του νερού) πριν το ψεκασμό. Οι λεπτότερες σκόνες λόγω της μεγάλης αναλογίας επιφανειακών εμβαδών τους προς όγκο μπορούν να συγκρατήσουν μεγάλη ποσότητα υγρασίας από τις πιο χονδρές σκόνες (Crawmer 2004). Μια σφαίρα έχει το χαμηλότερο εμβαδόν επιφάνειας σε μια αναλογία όγκου οποιασδήποτε γεωμετρίας και επομένως ένα σφαιρικό σχήμα απορροφά λιγότερη επιφανειακή υγρασία από τα ακανόνιστα σχηματιζόμενα σωματίδια.

Η χημική σύνθεση μιας σκόνης μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X (XRF) και η επιφάνεια της σκόνης μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας

φασματοσκοπία φωτοηλεκτρικών ακτίνων Χ (XPS). Το XPS είναι μια χρήσιμη τεχνική για τη μέτρηση της επιφανειακής μόλυνσης των σκονών και των επικαλύψεων που προκύπτουν. Η περίθλαση ακτίνων Χ (XRD, Cullity και Stock 2001) χρησιμοποιείται ευρέως για την αναγνώριση των φάσεων που υπάρχουν στη σκόνη. Η σύγκριση των αρχικών φάσεων στη σκόνη και των φάσεων στην επίστρωση ψεκασμού με ψυχρό έλασμα μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές φάσης κατά τη διάρκεια του ψεκασμού. Η στοιχειακή κατανομή των σύνθετων ή των συσσωματωμένων σκονών μπορεί να ληφθεί από την ανάλυση ενεργειακής απόκρισης ακτίνων Χ (EDX) στη μεταλλογραφική διατομή των σωματιδίων σκόνης.

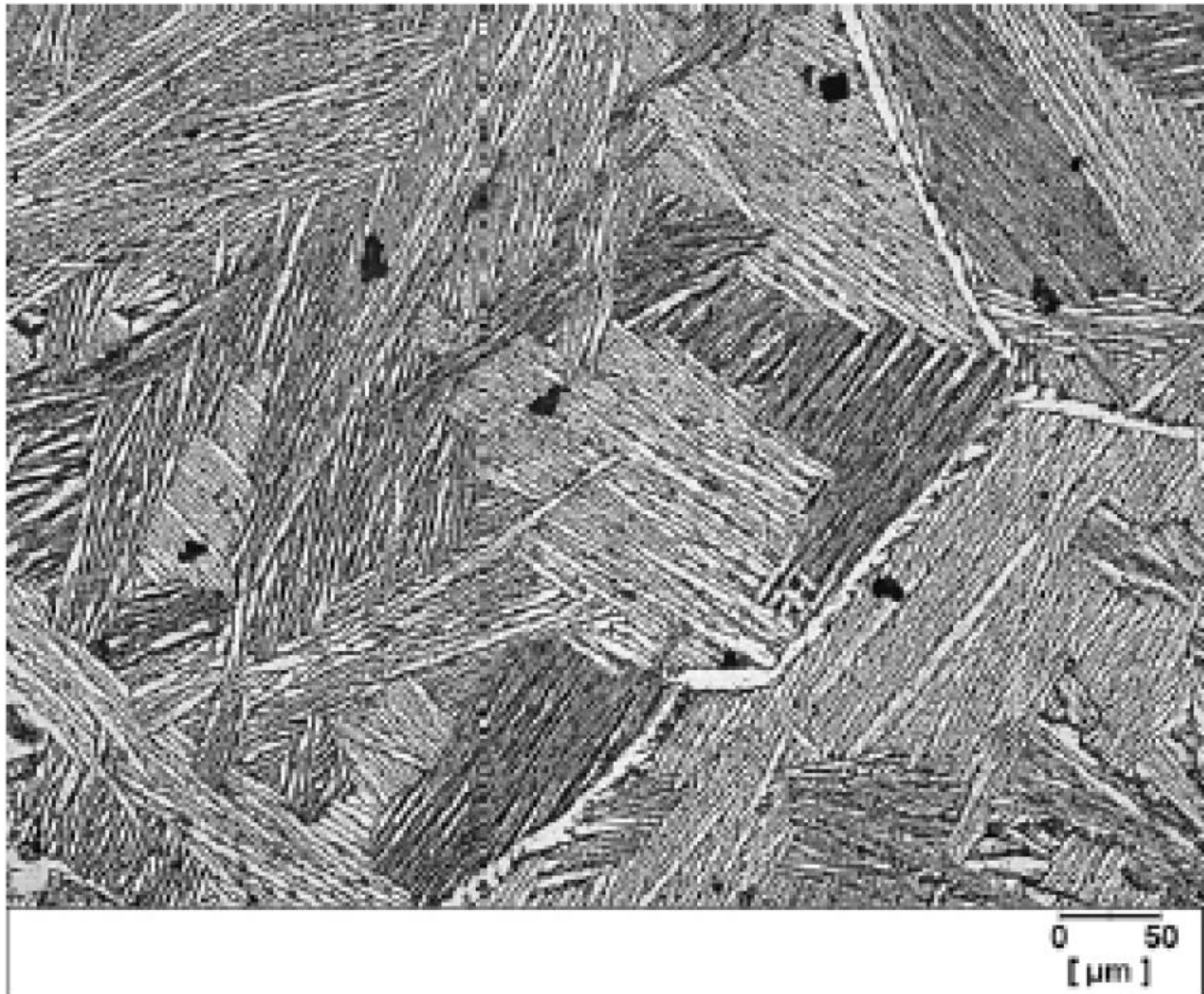
### 3.1.4 Ρευστότητα

Η ροή είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη τροφοδοσία σε σκόνη στον κλάδο ψεκασμού εν ψυχρώ. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ρευστότητα μιας σκόνης και η φαινόμενη πυκνότητα μετράται με τη χρήση μετρητή ροής Hall. Ο όρος πυκνότητα σε σχέση με τη σκόνη χρησιμοποιείται χαλαρά στη βιομηχανία θερμικού / ψυχρού ψεκασμού. Η φαινόμενη πυκνότητα είναι το ειδικό βάρος της σκόνης, συμπεριλαμβανομένων των χώρων μεταξύ των σωματιδίων σκόνης και οποιουδήποτε πορώδους μέσα στα σωματίδια (Crawmer 2004). Η φαινόμενη πυκνότητα σχετίζεται με τη συσκευασία των σκονών και επηρεάζεται από την κατανομή μεγέθους σωματιδίων σε σκόνη. Η φαινόμενη πυκνότητα της πρώτης ύλης επηρεάζει την τροφοδοσία ψεκασμού κατά τον ψυχρό ψεκασμό.

## 3.2 Μέθοδοι παραγωγής σκόνης

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στον ψυχρό ψεκασμό είναι κυρίως μεταλλικά. Κατά τη νεαρή ηλικία της διαδικασίας ψεκασμού κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, εμπορικά καθαρή πρώτη ύλη χαλκού χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα για τη βελτιστοποίηση των διαστάσεων του ακροφυσίου και των παραμέτρων διεργασίας. Η ευρεία χρήση του χαλκού οφείλεται στην ολκιμότητα του και στη διαθεσιμότητα της σκόνης σε επιθυμητά μεγέθη. Η έρευνα και ανάπτυξη που αφορούσαν χαλκό ακολουθήθηκαν στενά για το αλουμίνιο και το νικέλιο. Οι περισσότερες από αυτές τις μεταλλικές σκόνες παρήχθησαν χρησιμοποιώντας τεχνικές ψεκασμού και είχαν σφαιρική μορφολογία. Με την εισαγωγή εμπορικού εξοπλισμού ψεκασμού στις αρχές του εικοστού πρώτου αιώνα, σημαντική προσπάθεια έρευνας και ανάπτυξης επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη επικαλύψεων από τιτάνιο εμπορικής καθαρότητας, η οποία ακολουθήθηκε από σκόνες σπόγγου τιτανίου και κράματος τιτανίου (όπως Ti-6Al-4V). Το σημερινό ενδιαφέρον για την

συσσκευή ψυχρού ψεκασμού εστιάζει στον ψεκασμό σκονών κράματος όπως In 718, MCrAlY και σύνθετων σκονών από μείγματα.



Εικόνα 1 Μικροφωτογραφία της δομής του Ti-6Al-4V (Yule and Dunkley 1994)

Νέα επιχρίσματα από σκληρό μέταλλο με κεραμικά, τα οποία δεν ήταν δυνατόν να εναποτεθούν με ψυχρό ψεκασμό στο παρελθόν, τώρα μπορούν να εναποτεθούν επιτυχώς χρησιμοποιώντας νέους σχεδιασμούς σκόνης και διεργασίες κατασκευής. Επιπλέον, η ανάπτυξη στον εξοπλισμό ψυκτικού ψεκασμού με υψηλότερη πίεση και θερμοκρασία αερίου σημαίνει τα υλικά που ήταν δύσκολο να ψεκαστούν μπορούν τώρα να εναποτεθούν. Οι ακόλουθοι τύποι σκονών έχουν αποθεθεί με επιτυχία χρησιμοποιώντας κρύο ψεκασμό:

- Μέταλλα: Cu, Al, Ni, Zn, Ti
- Πυρίμαχα μέταλλα: Zr, Ta



- Κράματα: Ανοξειδωτος χάλυβας 316, κράματα αλουμινίου, MCrAlY
- Οξείδια: TiO<sub>2</sub>
- Cermet (συνδυασμός κεραμικού και μετάλλου): WC-Co / Ni
- Διαμεταλλικά: Fe / Al

### 3.2.1 Ατομιοποίηση

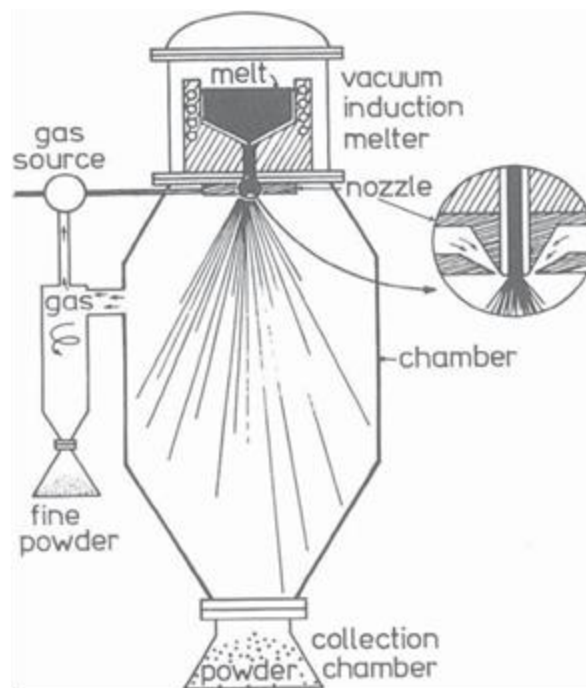
Η ατομιοποίηση είναι μια διαδικασία διάσπασης ενός τήγματος σε σταγονίδια, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως με ψεκασμό μέσω ακροφυσίου, με το χύσιμο του πάνω σε περιστρεφόμενο δίσκο, ηλεκτροστατικά και υπερηχητικά (Yule and Dunkley 1994).

Η επιστήμη και η μηχανική της ατομιοποίησης είναι αρκετά καλά κατανοητή και τεκμηριωμένη. Οι σκόνες μετάλλων και κράματος κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ψεκασμού καθώς τα μέταλλα τήκονται σε καλά καθορισμένη υψηλή θερμοκρασία για να παράγουν υγρό χαμηλού ιξώδους. Η ατομιοποίηση είναι κατάλληλη για τα περισσότερα μέταλλα όπως κασσίτερο, μολύβι, ψευδάργυρο, αλουμίνιο, μαγνήσιο, άργυρο, χαλκό, χρυσό, παλλάδιο, κοβάλτιο, νικέλιο, σίδηρο και χάλυβα και ακόμη και πυρίμαχα μέταλλα όπως το βολφράμιο. Τα μέταλλα που τήκονται πάνω από 2000 K είναι δύσκολο να ατομιοποιηθούν λόγω φυσικών δυσκολιών. Αν και δεν χρησιμοποιείται ευρέως, η διάσπαση υάλου, κεραμικών και πολυμερών έχει μελετηθεί σε κάποιο περιορισμένο βαθμό. Το σχήμα 27 δείχνει το σχηματικό σχήμα μιας διαδικασίας ατομιοποίησης αδρανούς αερίου.

Στην ατομιοποίηση σχηματίζεται υγρό με τήξη μιας ουσίας και το τελικό προϊόν είναι ένα στερεό το οποίο είναι σκόνη. Μόνο η ατομιοποίηση αερίου και νερού χρησιμοποιείται ευρέως για σκόνες κρύου ψεκασμού. Σε ένα ατομιοποιητή, το μέταλλο ή το κράμα τήκεται σε ένα επαγωγικό θερμαντήρα δημιουργώντας ένα τήγμα το οποίο στη συνέχεια χύνεται σε ένα χωνευτήριο με βαθμονομημένη έξοδο όπου το τήγμα πέφτει κάτω ως ένα ρεύμα υγρού μέσα σε ένα ακροφύσιο. Το συνεχές ρεύμα υγρού μετάλλου διασπάται σε σταγονίδια με πρόσκρουση ρεύματος αερίου ή νερού μέσα στο ακροφύσιο (Pawlowski 2008). Το μέταλλο στερεοποιείται κατά τη διάρκεια της ελεύθερης πτώσης μέσα στο θάλαμο σχηματίζοντας μικρά σωματίδια σκόνης.

Υπάρχουν περιοχές μεταβλητών που επηρεάζουν την ποιότητα σκόνης που παράγεται με τη τεχνική ατομιοποίησης όπως η γεωμετρία ακροφυσίων, ταχύτητα και η πίεση των μέσων ψεκασμού, η καθαρότητα αερίου, η γεωμετρία ψεκασμού ψεκασμού, η υπερθέρμανση του

τήγματος (δηλαδή θερμοκρασία πάνω από το σημείο τήξης), η σύνθεση του τήγματος, το ιξώδες και η επιφανειακή τάση του τήγματος, το ύψος του πύργου ψύξης, κλπ.



Σχήμα 27 Σχηματική απεικόνιση ατομοποιητικού αδρανούς αερίου. (Yule and Dunkley 1994)

Η ατομοποίηση αερίου εκτελείται χρησιμοποιώντας αέρα ή αδρανή αέρια όπως αργόν και ήλιο, τα οποία διασπούν το ρέον ρεύμα υγρού μετάλλου. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διάσπασης του υγρού κατά τη διαδικασία ψεκασμού. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενοι τρόποι περιλαμβάνουν τον σχηματισμό κυμάτων σε φύλλα, κατόπιν τον σχηματισμό συνδέσμων και τελικά τη διάσπαση του συνδέσμου σε σταγονίδια που οδηγούν σε σφαιροειδισμό (Berndt 2004b). Υπάρχουν δύο παραλλαγές της διαδικασίας διάσπασης του αερίου που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία παραγωγής σκόνης: (α) στενά περιορισμένα ακροφύσια, (β) ανοικτά ακροφύσια (Klar and Shafer 1972). Σε ένα κλειστό ακροφύσιο, το τήγμα διέρχεται μέσω ενός σωλήνα τροφοδοσίας πριν το αέριο χτυπήσει το τήγμα καθώς βγαίνει από το ακροφύσιο. Από την άλλη πλευρά, στα ανοικτά ακροφύσια, το ρεύμα μετάλλου πέφτει σε κάποια απόσταση από το ακροφύσιο στη συρροή του ρεύματος αερίου που έχει δημιουργηθεί από το ακροφύσιο αερίου.

Η κόνις ψεκασμού απαιτεί πολύ υψηλή καθαρότητα που είναι ουσιαστικά ελεύθερη από οξυγόνο. Αυτός είναι ο λόγος που ο εξαερισμός αδρανούς αερίου και ο ψεκασμός κενού χρησιμοποιούνται

συχνά για την παραγωγή κόνεως κρύου ψεκασμού. Υπάρχουν συστηματικές μελέτες που δημοσιεύονται στη βιβλιογραφία με τον Cu, οι οποίες έδειξαν ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο της σκόνης, αυξάνει την κρίσιμη ταχύτητα, την ελάχιστη ταχύτητα που απαιτείται για εναπόθεση (Li et al., 2006).

Στην ατομιοποίηση αερίου, τα σωματίδια σκόνης εμφανίζουν γενικά ταχεία ψύξη, μεταγενέστερο ρυθμό ταχείας στερεοποίησης και εμφανίζουν σβησμένη μικροδομή με λεπτούς κόκκους (ακόμη και εξαιρετικά λεπτή δομή κόκκων), μετατόπιση υψηλής πυκνότητας και κορεσμένο διάλυμα στοιχείων κράματος (Rokni et al., 2014). Αυτό το φαινόμενο απόσβεσης αυξάνει τη σκληρότητα των σωματιδίων σκόνης ψεκασμού και έτσι μειώνει την δυνατότητα παραμόρφωσης.

Οι πίδακες νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανοικτή διαμόρφωση ακροφυσίων που περιγράφηκε προηγουμένως, καθώς το νερό δεν τείνει να χάνει την κινητική ενέργεια εξίσου γρήγορα με τις πίδακες αερίου. Οι πίδακες νερού επίσης δεν τείνουν να εξαπλώνονται όσο αυτοί των αερίων. Οι σχεδιασμοί αυτής της εφαρμογής τυπικά επιτρέπουν στο ρεύμα τήγματος να πέσει 100-500 mm πριν χτυπήσει από το νερό. Ο πίδακας νερού τείνει να παράγει ελαφρώς πιο ακανόνιστα σωματίδια από την ατομιοποίηση αερίου (Berndt 2004b), αλλά η βιομηχανία ευνοεί αυτή τη διαδικασία λόγω των υψηλών ποσοστών παραγωγής της. Τα στάδια αφυδάτωσης ή αναγωγής είναι απαραίτητα για να φέρουν την περιεκτικότητα σε υγρασία και οξυγόνο της σκόνης εντός του συγκεκριμένου ορίου.

Το κύριο πλεονέκτημα της ατομιοποίησης αερίου έναντι αυτής με νερό είναι η ενίσχυση της σφαιρικής μορφολογίας. Οι κόνεις που παράγονται μέσω της διάσπασης αερίων είναι σχετικά καθαρότερες και έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε οξείδια. Το επίπεδο οξυγόνου στην σκόνη τροφοδοσίας είναι ζωτικής σημασίας καθώς η συγκόλληση στον ψυχρό ψεκασμό απαιτεί καθαρές μεταλλικές διεπαφές χωρίς οξείδιο. Και οι δύο μέθοδοι έχουν πολύ υψηλές ταχύτητες ψύξης, για παράδειγμα, σε ψεκασμό νερού, τα σωματίδια ψύχονται στους  $104-106\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{s}$ , ενώ ο ρυθμός ψύξης στον ψεκασμό αερίου είναι  $103-105\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{s}$  - τάξης μεγέθους χαμηλότερης (Berndt 2004b).

Γενικά, η ατομιοποίηση σε παραγωγή μετάλλου και σκόνης κράματος μπορεί να χειριστεί ένα ευρύ φάσμα εξόδων, συνήθως 1-100.000 t/έτος, και μπορεί να παράγει ένα ευρύ φάσμα μεγεθών από 10 μm έως 10 mm. Το κύριο πλεονέκτημα του ψεκασμού είναι η ικανότητα να ελέγχεται η κατανομή μεγέθους και το σχήμα των σωματιδίων μάλλον καλά, μέσα σε πολύ στενό όριο. Κάποιος μπορεί να παράγει κοντινά σφαιροειδή σωματίδια χρησιμοποιώντας ατμοποίηση αερίου η οποία έχει καλύτερες ιδιότητες ροής από οποιοδήποτε αλεσμένο σωματίδιο.

### 3.2.2 Ξήρανση με ψεκασμό (συσσωμάτωση)

Η ξήρανση με ψεκασμό είναι ένας τρόπος παρασκευής σκόνης ο οποίος επιτρέπει τη συσσωμάτωση διαφόρων τύπων υλικών. Μία τυπική διαδικασία ξήρανσης με ψεκασμό αποτελείται από διάφορα στάδια: παρασκευή πολτών, ψεκασμό πολτών, ξήρανση του ψεκασμού και συμπύκνωση των σωματιδίων. Ένας πολτός από λεπτά διεσπαρμένα πρόδρομα, οργανικό συνδετικό υλικό και νερό εισάγεται σε ένα μεγάλο κενό θάλαμο χρησιμοποιώντας μια αντλία ιλύος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυγόκεντρος ή ακροφύσιο για τον ψεκασμό του πολτού, ο οποίος ακολούθως ξηραίνεται με τη χρήση αερίου. Τα στερεά σωματίδια συλλέγονται στον συλλέκτη σκόνης. Η σκόνη που παράγεται μέσω αυτής της τεχνικής είναι συνήθως πορώδης και απαιτεί ένα στάδιο συμπύκνωσης. Η συσσωμάτωση και η πυροσυσσωμάτωση είναι μια προτιμώμενη οδός για σκόνες όπως οξειδία, νιτρίδια και cermets. Οι σκόνες που παράγονται μέσω της διεργασίας ξήρανσης με ψεκασμό δεν έχουν ακόμη βρει εμπορική εφαρμογή ψεκασμού, αλλά αρκετές πειραματικές μελέτες ανέφεραν τον ψυχρό ψεκασμό τέτοιων κόνεων.

### 3.2.3 Συγκόλληση και σύνθλιψη

Τυπικά, τα οξειδία και οι κεραμομεταλλουργικές ενώσεις είναι παραδείγματα σκόνης που παράγονται μέσω συντήξεως και σύνθλιψης. Οι πυροσυσσωματωμένες σκόνες είναι ακανόνιστου σχήματος, οι οποίες έχουν χαμηλή ικανότητα ροής σε ψυχρό ψεκασμό. Η πυροσυσσωμάτωση συνήθως λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες γύρω στο 0,7 x σημείο τήξης. Οι σκόνες που παράγονται από την πυροσυσσωμάτωση είναι συνήθως πυκνές. Το WC παράγεται με την επίστρωση βολφραμίου ακολουθούμενη από σύνθλιψη και διαλογή για να επιτευχθεί το επιθυμητό εύρος μεγέθους. Η θρυμματισμένη σκόνη στη συνέχεια αναμιγνύεται με Co με ένα οργανικό συνδετικό υλικό και συντηγμένη υπό μία μειωτική θερμοκρασία.

### 3.2.4 Υδρίδια-Ανυδρίδια

Η εμπορική καθαρή σκόνη τιτανίου και κράματα τιτανίου παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον για την κοινότητα καθώς η έλλειψη τήξης σωματιδίων και οξειδωσης κατά τον ψεκασμό έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση των αρχικών ιδιοτήτων κόνεως. Ο υδρίδιο-αφυδρίτης (HDH) είναι μια χημική διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή πρώτης ύλης τιτανίου και κράματος τιτανίου. Το κόστος κατασκευής αυτής της σκόνης είναι πολύ μικρότερο από το υλικό τροφοδοσίας τιτανίου με ατομιοποίηση. Η τυπική μορφολογία των σκονών που παράγονται με τη

μέθοδο HDH είναι ακανόνιστη. Η διαδικασία κατασκευής βασίζεται στην εύθραυστη φύση ορισμένων μεταλλικών υδριδίων που μπορούν να αλεσθούν και να κοσκινιστούν (Hussain 2013).

Το επίπεδο των ακαθαρσιών στο τιτάνιο είναι κρίσιμο, καθώς αυτό μπορεί να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Για τις λεπτότερες σκόνες, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι ευαίσθητη στην αναλογία επιφάνειας σωματιδίων προς όγκο. Καθώς μειώνεται η διάμετρος σωματιδίων, αυξάνεται σημαντικά ο λόγος επιφάνειας σωματιδίου προς όγκο. Η σημασία αυτού είναι το γεγονός ότι καθώς το μέγεθος σωματιδίων μειώνεται η περιεκτικότητα σε οξυγόνο αυξάνεται.

Στη διαδικασία HDH, η πρώτη ύλη αρχικά φορτώνεται σε μονάδα υδριδίου και το υλικό θερμαίνεται υπό ατμόσφαιρα υδρογόνου. Η αντίδραση έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό υδριδίου του τιτανίου ( $TiH_2$ ). Αυτό το εύθραυστο  $TiH_2$  συνθλίβεται σε λεπτότερο μέγεθος σωματιδίων. Τα λεπτά σωματίδια επιστρέφονται στη μονάδα υδριδίου για τη διαδικασία αφαίρεσης του.

Τα σωματίδια τοποθετούνται κάτω από υψηλό κενό και θερμαίνονται για να απελευθερώσουν το υδρογόνο από τα σωματίδια κατά τη διάρκεια μιας αναστρέψιμης αντίδρασης. Η σκόνη στη συνέχεια κοσκινίζεται για να απομακρυνθούν τυχόν συντηγμένα σωματίδια. Η μορφολογία της σκόνης επηρεάζεται από τις αρχικές πρώτες ύλες σε αυτή τη διαδικασία. Επί του παρόντος, υπάρχουν τρεις πηγές πρωτογενούς τιτανίου: επεξεργασμένο τιτάνιο, τιτάνιο με μειωμένο νάτριο ή μαγνήσιο.



Εικόνα 2 σκόνη τιτανίου (Yule and Dunkley 1994)

### 3.2.5 Άλλες διαδικασίες παραγωγής

Η μηχανική κραματοποίηση είναι μια άλλη τεχνική για την παραγωγή μικρών παρτίδων πειραματικής σκόνης για ψυχρό ψεκασμό. Η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα για την κατασκευή διαμεταλλικών και νανοδομημένων επικαλύψεων από σύνθετα υλικά όπως Fe-Si και Fe-Al (Li et al., 2007a) (Wang et al., 2007). Σε μια διαδικασία μηχανικής κραματοποίησης, η ενέργεια τριβής από τη διαδικασία άλεσης προκαλεί πλαστική παραμόρφωση των σωματιδίων.

Υπάρχουν άλλες διαδικασίες όπως η κατασκευή υδροξυλίου, η οποία χρησιμοποιείται επίσης για την παρασκευή κόνεων για ψυχρό ψεκασμό. Τυπικά, οι σκόνες νικελίου και σιδήρου κατασκευάζονται μέσω αυτής της διαδρομής. Οι σκόνες που παράγονται με αυτή τη μέθοδο δεν είναι σφαιρικές, αν και μπορεί να παρουσιάζουν σφαιρικό σχήμα.



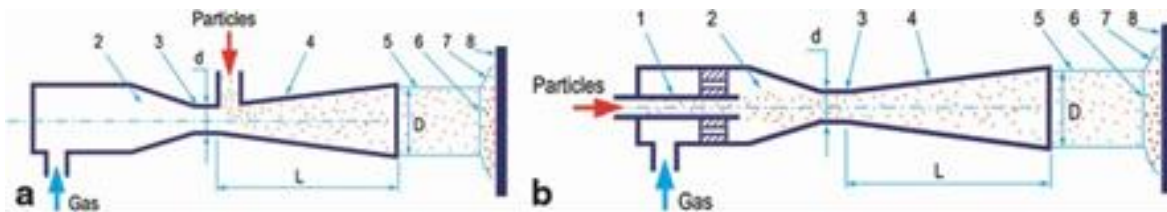
Εικόνα 3 Σκόνη Fe-Si (Yule and Dunkley 1994)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> ΕΜΠΟΡΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ COLD SPRAY

### 4.1 Ακροφύσια ψυχρού ψεκασμού

Το ακροφύσιο ψεκασμού είναι ένα σημαντικό στοιχείο σχεδιασμού σε ένα πιστόλι ψυχρό ψεκασμού. Διαδραματίζει τον κρίσιμο ρόλο της μετατροπής αερίου υψηλής ενθαλπίας, υψηλής πίεσης και χαμηλής ταχύτητας σε πίδακα αερίου χαμηλής ενθαλπίας, χαμηλής πίεσης και υψηλής ταχύτητας που απαιτείται για επιτάχυνση σωματιδίων. Ο απώτερος στόχος ενός ακροφυσίου ψυχρού ψεκασμού είναι να δημιουργηθούν ευνοϊκές συνθήκες ροής αερίου στην έξοδο του, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ικανότητα των σωματιδίων να στερεοποιούνται αποτελεσματικά κατά την κρούση με το υπόστρωμα. Τυπικά, χρησιμοποιείται συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο τύπου DeLaval για τη δημιουργία επιθυμητής υπερηχητικής ροής αερίου στην έξοδο του ακροφυσίου. Τα χαρακτηριστικά της υπερηχητικής ροής, συμπεριλαμβανομένης της κινητικής και της θερμικής ενεργειακής της περιεκτικότητας, είναι συνάρτηση τόσο της γεωμετρίας του ακροφυσίου όσο και των παραμέτρων του αερίου (τύπος αερίου, πίεση και θερμοκρασία). Η ποσότητα ενέργειας (θερμική και κινητική) που πραγματικά μεταφέρεται στα σωματίδια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα φυσικά χαρακτηριστικά της σκόνης (π.χ. πυκνότητα, σχήμα, κατανομή μεγέθους κλπ.), που και πώς εισάγονται τα σωματίδια στο ρεύμα αερίων και του λόγου της μάζας σκόνης προς αέριο.

Μερικές σημαντικές παράμετροι της γεωμετρίας του ακροφυσίου (Σχήμα 28) είναι ο λόγος απόκλισης ( $D / d$ ), το αποκλίνον σχήμα και το μήκος του αποκλίνοντος τμήματος. Αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της ροής αερίου μέσα και στην έξοδο του ακροφυσίου. Όταν βελτιστοποιούν τη γεωμετρία του ακροφυσίου για να μεγιστοποιήσουν την ταχύτητα της ροής του αερίου, οι σχεδιαστές συχνά χρησιμοποιούν λογισμικό CFD. Καθώς ο πίδακας αερίου φεύγει από το ακροφύσιο, επικρατούν και άλλες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένου του κυματισμού και των συμπιεσμένων στρωμάτων που μπορεί να επηρεάσουν τις συνθήκες κρούσης των σωματιδίων στο υπόστρωμα. Στην πράξη, οι διάμετροι εξόδου στρογγυλού ακροφυσίου κυμαίνονται από 2 έως 12 mm, ενώ οι διαμέτρους του λαιμού κυμαίνονται από 1,0 έως 3,0 mm. Λόγω του ορίου για την προσκόλληση έναντι των συνθηκών αναπήδησης, το πλάτος οποιουδήποτε ψεκασμού είναι σχετικά μικρό.



Σχήμα 28 Οι παράμετροι του ακροφυσίου έγχυσης κατάντη και ανάντη. 1 σωλήνας για την έγχυση σωματιδίων, 2 προθάλαμος, 3 λαιμός ακροφυσίου ( $d =$  διάμετρος), 4 αποκλίνοντα υπερηχητικά τμήματα, 5 ελεύθερος πίδακας, 6 κύμα τόξου κρούσης, 7 συμπιεσμένο στρώμα, 8 υπόστρωμα. (Parygin et al., 2007, Parygin 2001)

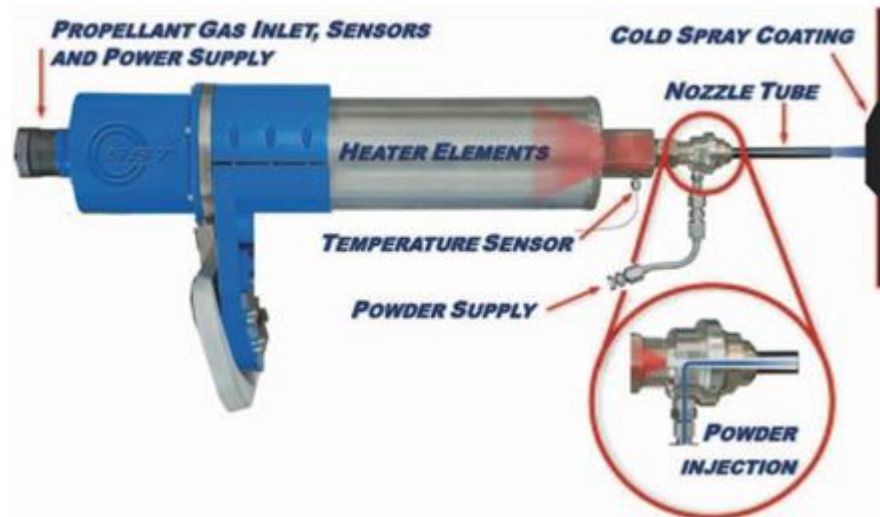
Η επαναλαμβανόμενη χρήση ακροφυσίων μπορεί τελικά να προκαλέσει φραγή ακροφυσίων ή / και εσωτερική φθορά διάβρωσης. Ο φραγμός του ακροφυσίου είναι επικρατέστερος με καθαρά μέταλλα όπως κασίτερο, αλουμίνιο, νικέλιο και ίνδιο. Οι μηχανισμοί φραγμού των ακροφυσίων δεν είναι πλήρως κατανοητοί, αλλά είναι φανερό ότι ο τελικός όγκος του ακροφυσίου, η θερμοκρασία της επιφάνειας και η χημεία της επιφάνειας διαδραματίζουν θεμελιώδεις ρόλους. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν ή να αποφευχθεί ο φραγμός των ακροφυσίων, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο προσεγγίσεις: (α) κατασκευάζουν ακροφύσια από πολυμερή υψηλής θερμοκρασίας τα οποία εμφανίζουν χαρακτηριστικά που δεν επιτρέπουν το φραγμό ή / και (β) κατασκευάζουν ακροφύσια από μέταλλα αλλά με την προσθήκη συνεχούς ψύξης νερού, και με εξαιρετικά γυαλισμένες εσωτερικές επιφάνειες. Στην προηγούμενη προσέγγιση, οι κατασκευαστές σημειώνουν ότι τα πολυμερή εμφανίζουν συνήθως μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας περίπου  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Συνεπώς, τα σχέδια των ακροφυσίων γίνονται υβριδικά με το συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου να κατασκευάζεται από μέταλλο, ενώ περιορίζεται το πολυμερές τμήμα του ακροφυσίου στο αποκλίνον τμήμα (ψυγείο) όσο το δυνατόν περισσότερο από το λαιμό του ακροφυσίου. Η εξωτερική ψύξη του νερού στο ακροφύσιο είναι επίσης αποτελεσματική για την αποφυγή της φραγής. Ωστόσο, αυτό προσθέτει πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό που περιορίζει την προσβασιμότητα αυξάνοντας παράλληλα το κόστος απόκτησης και λειτουργίας του πιστολιού ψεκασμού.

#### 4.1.1 Κατάντη εξοπλισμός έγχυσης

Στην κατάντη εισαγωγή, αέρας ή άζωτο, σε χαμηλές έως μέτριες πιέσεις (4-34 bar), προθερμαίνεται στους  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Αυτό το αέριο υψηλής ενθαλπίας ωθείται έπειτα διαμέσου του συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου ώστε να επιτρέπεται η μετατροπή της ενθαλπίας σε κινητική ενέργεια με ταχεία εξάπλωση του αερίου προς το υπερηχητικό (συνήθως γύρω στα 300-900 m / s).



Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας μετασχηματισμού ενέργειας, το αέριο επιταχύνεται καθ' όλη τη διάρκεια του αποκλίνοντος μήκους του ακροφυσίου, ενώ η θερμοκρασία του πέφτει σημαντικά. Το μοναδικό χαρακτηριστικό αυτής της οικογένειας εξοπλισμού είναι ότι η πρώτη ύλη σκόνης εισάγεται προς τα κάτω στο αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου (Σχήμα 29).



Σχήμα 29 Ένα σχέδιο που δείχνει την αρχή λειτουργίας του καταντή εξοπλισμού έγχυσης. (Villafuerte κ.ά., 2010)

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου της κατάντη έγχυσης είναι η ικανότητά της να λειτουργεί χωρίς την ανάγκη ενός τροφοδότη σκόνης υψηλής πίεσης, όταν λειτουργεί σε πιέσεις κάτω των 9 bar. Αυτό συμβαίνει επειδή, σε αυτές τις χαμηλές πιέσεις, υπάρχει αρκετή αρνητική πίεση (κάτω από την ατμοσφαιρική) που δημιουργείται στην αποκλίνουσα πλευρά του ακροφυσίου για να αναρροφήσει σκόνη ψεκασμού στο ρεύμα εκτόξευσης.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι μόνο το αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου υπόκειται σε διάβρωση από την άμεση πρόσκρουση της σκόνης ψεκασμού. Επομένως, οι σχεδιαστές συχνά χωρίζουν το ακροφύσιο σε δύο ξεχωριστά εξαρτήματα: τη θήκη ακροφυσίων, η οποία περιέχει το συγκλίνον τμήμα συν το στόμιο του ακροφυσίου ή το στόμιο και το σωλήνα ακροφυσίου, το οποίο είναι το αποκλίνον τμήμα του ακροφυσίου. Επειδή ο συγκρατητήρας ακροφυσίων βλέπει μόνο καθαρό αέριο, η διάρκεια ζωής αυτού του εξαρτήματος είναι ουσιαστικά απεριόριστη. Από την άλλη πλευρά, ο σωλήνας ακροφυσίου υφίσταται διάβρωση από τη σκόνη ψεκασμού, και απαιτεί τακτική αντικατάσταση κατά τη διάρκεια ζωής του. Η διάρκεια ζωής αυτού του στοιχείου σχετίζεται με τη σύνθεση του σωλήνα καθώς και με τη φύση της σκόνης ψεκασμού.

Όταν σχεδιάζονται για χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες αερίου, τα συστήματα αυτά μπορούν να είναι συμπαγή, φορητά και πολύ οικονομικά. Ωστόσο, σε χαμηλές πιέσεις αερίου και θερμοκρασίες, οι μέγιστες δυνατές ταχύτητες σωματιδίων μπορούν να περιορίσουν το εύρος των υλικών που μπορούν να ψεκαστούν ώστε να συμπεριλάβουν όγκιμα μέταλλα χαμηλού σημείου τήξης όπως καθαρό αλουμίνιο, ψευδάργυρο και κασσίτερο. Ευτυχώς, η ικανότητα ψεκασμού αυτών των υλικών, σε χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες αερίου, μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά με την προσθήκη σκληρότερων σωματιδίων στο μίγμα σκόνης (συνήθως κεραμικά). Τα κεραμικά σωματίδια του μίγματος παράγουν ένα μικρο-σφυρηλατημένο αποτέλεσμα που βοηθά όχι μόνο στο να συμπιεστούν τα υποκείμενα στρώματα αλλά και να καθαρίζει συνεχώς τις επιφάνειες και να αυξάνει την τραχύτητα της επιφάνειας για καλύτερη πρόσφυση (Maev and Leshchynsky 2008). Σημειώνεται επίσης ότι ένα ποσοστό αυτών των σωματιδίων σφυρηλασίας καταλήγει ενσωματωμένο ως διασκορπισμένο σε μια πλήρως παραμορφωμένη μεταλλική μήτρα, με αποτέλεσμα μια σύνθετη επικάλυψη. Ανάλογα με την εφαρμογή, τέτοια σύνθετη μικροδομή μπορεί να είναι ευεργετική ή να αποτελεί περιορισμό. Για παράδειγμα, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες που προέρχονται από την ενίσχυση της διάχυσης είναι ευνοϊκές, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η παρουσία μηχανικά συνδεδεμένων διεπιφανειών κεραμικού-μετάλλου μπορεί να αποτελεί πρόκληση όταν εκτίθεται σε εξαιρετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Ένα από τα πρώιμα εμπορικά συστήματα έγχυσης προς τα κάτω αναπτύχθηκε στη Ρωσία από το Obninsk Center for Powder Spraying Ltd. (OCPS) με την επωνυμία DYMET (Dymet Corporation 2014, Σχ. 30). Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί πεπιεσμένο αέρα (5-8 bar) στα 400 l / min θερμαινόμενο στο πιστόλι σε μέγιστο 600 ° C.



Σχήμα 30 Φορητός εξοπλισμός κατάντη έγχυσης DYMET

Το πιστόλι ψεκασμού περιλαμβάνει έναν ελαφρύ θερμαντήρα αέρα 3,5 kW και έναν αντικαταστάσιμο σωλήνα ακροφυσίου. Η διάρκεια ζωής του ακροφυσίου είναι περίπου 1 ώρα ψεκασμού για ρυθμό τροφοδοσίας σκόνης περίπου 0,5 g / s. Λόγω της απαιτούμενης χαμηλής πίεσης, αυτό το σύστημα έγχυσης κατάντη χρησιμοποιεί έναν απλό σταθμό τροφοδοσίας σκόνης βαρύτητας. Το σύστημα αυτό έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη Ρωσία και σε άλλες χώρες, κυρίως για την επιδιόρθωση στο πεδίο, συμπεριλαμβανομένης της επισκευής διάβρωσης, και την αποκατάσταση διαίρεσης με εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, χαλκό, ψευδάργυρο, νικέλιο, κασσίτερο και μόλυβδο αναμειγμένο με κατάλληλες ποσότητες κεραμικών σωματιδίων για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης απόθεσης. Η τυπική απόδοση εναπόθεσης είναι 20-30% με ρυθμό εναπόθεσης 3-10 g / min για αυτά τα υλικά.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας αυξήθηκαν οι μέγιστες λειτουργικές πιέσεις του κατάντη εξοπλισμού έγχυσης, με αποτέλεσμα την αύξηση των αποτελεσμάτων εναπόθεσης και την επέκταση του εύρους των υλικών που μπορούν να ψεκαστούν σε άλλα υλικά όπως ανοξειδωτοι χάλυβες, τιτάνιο και κράματα με βάση το νικέλιο. Το 2006, η CentreLine (Windsor) Limited απέκτησε αποκλειστικά δικαιώματα από την OCPS για να εμπορευτεί αυτή την τεχνολογία για την αγορά της Βόρειας Αμερικής (CentreLine Limited 2015). Οι βιομηχανικές μονάδες SSTTM του CenterLine είναι έτοιμες προς παραγωγή μηχανές έγχυσης, βασισμένες στην ίδια αρχή με τις μηχανές Dymet (Kashirin et al., 2002), αλλά λειτουργούν σε ευρύτερη κλίμακα πιέσεων αερίου (4-34 bar) χρησιμοποιώντας αέρα, ή ηλίου και παρέχουν θέρμανση με αέριο μέχρι 550 ° C με κατανάλωση ισχύος 3,8, 4,2 και 15 kW, ανάλογα με το συγκεκριμένο μοντέλο. Αυτά τα συστήματα (σχ. 31 και 32 (α)) κατασκευάστηκαν για να συμμορφωθούν με όλα τα βιομηχανικά πρότυπα της Βόρειας Αμερικής. Αυτός ο εξοπλισμός χρησιμοποιείται εμπορικά για επισκευή διάβρωσης, αποκατάσταση διαστάσεων, επιμετάλλωση και άλλες εφαρμογές στον τομέα ή σε ελεγχόμενο περιβάλλον για χειροκίνητες ή πλήρως αυτοματοποιημένες λειτουργίες. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο χρόνος λειτουργίας, τα αρθρωτά συγκροτήματα ακροφυσίων των Supersonic Spray Technologies (SST) έρχονται με μια μπαγιονέτ κλειδαριά για γρήγορη αλλαγή σωλήνα, η οποία μπορεί να φιλοξενήσει κάθε είδους διαμόρφωση ακροφυσίων (ευθεία ή 90 °) και σωλήνες ακροφυσίων, Ακροφύσια και ακροφύσια ανθεκτικά στη φθορά (σχ 32 (β)).



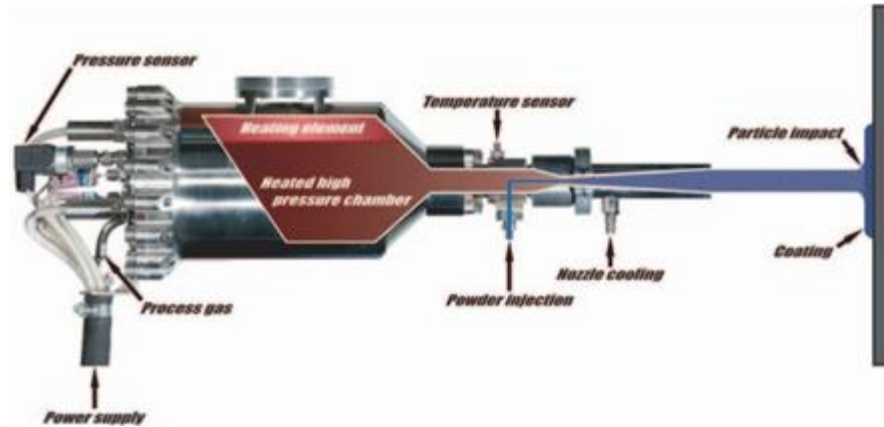
Σχήμα 31 Σύστημα έγχυσης κατάνη (15 kW / 34 bar / 550 ° C) με ενσωματωμένο ντουλάπι, εξαερισμό και βοηθητικά συστήματα για μηχανική λειτουργία.



Σχήμα 32 Σύστημα έγχυσης κατάνη (15 kW / 34 bar / 550 ° C) με ενσωματωμένο θάλαμο ψεκασμού, εξαερισμό και βοηθητικά συστήματα για ρομποτική λειτουργία. Β Μορφοποιημένα ακροφύσια ψεκασμού ευθείας και 90 ° προς τα κάτω για πολλαπλές εφαρμογές.

#### 4.1.2 Ανάντη εξοπλισμός έγχυσης

Στο ψυχρό ψεκασμό με ανάντη έγχυση, ηλίο ή άζωτο σε υψηλές πιέσεις (μέχρι 70 bar) προθερμαίνεται (μέχρι τους 1100 ° C). Παρόμοια με την κατάνη, αυτό το αέριο υψηλής ενθαλπίας ωθείται έπειτα μέσω ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου για να επιτραπεί η μετατροπή της ενθαλπίας σε κινητική ενέργεια μέσω της ταχείας επέκτασης του αερίου στο υπερηχητικό πεδίο (τυπικά γύρω στα 1000 m / s). Σε αυτόν τον τύπο εξοπλισμού, το τροφοδοτούμενο υλικό σκόνης εγχέεται αξονικά εντός του τμήματος ροής αερίου ανάντη του λαιμού του ακροφυσίου, χρησιμοποιώντας έναν τροφοδότη σκόνης υψηλής πίεσης (Σχ.33).



Σχήμα 33 Σχηματικό σχέδιο που δείχνει την αρχή λειτουργίας του ανάντη εξοπλισμού έγχυσης

Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι, λόγω της υψηλότερης πίεσης αερίου και του πρότερου σημείου έγχυσης, τα σωματίδια ψεκασμού μπορούν να επιτύχουν υψηλότερες ταχύτητες απ' ό,τι με τα συστήματα έγχυσης κατάντη, απλά λόγω της μακρύτερης αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωματιδίων και της δέσμης αερίων. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το φαινόμενο προθέρμανσης σκόνης, όπου τα σωματίδια πρώτης ύλης έχουν την πιθανότητα να προθερμανθούν στην πλευρά του τμήματος υψηλής πίεσης του ακροφυσίου, οδηγώντας σε υψηλότερη θερμοκρασία σωματιδίων από ό,τι σε ψεκασμό με κατάντη έγχυση. Αυτοί οι συνδυασμοί καταστούν τον ανάντη εξοπλισμό έγχυσης κατάλληλο για την εναπόθεση υλικών υψηλότερου σημείου τήξεως, όπως κράματα με βάση το νικέλιο και τάνταλου, ιδιαίτερα εάν το φέρον αέριο είναι ήλιο. Αυτά τα υλικά ψεκάζονται συνήθως πιο δύσκολα να με τον κατάντη εξοπλισμό έγχυσης.

Από την άλλη πλευρά, το υψηλό κόστος και η περιορισμένη διαθεσιμότητα ηλίου επηρεάζουν δυσμενώς την οικονομία και τον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό για τη χρήση των εφαρμογών ανάντη που απαιτούν αυτό το αέριο. Παρόλο που οι περιορισμοί αυτοί έχουν μετριαστεί σε κάποιο βαθμό από τα συστήματα ανάκτησης ηλίου, η πραγματικότητα είναι ότι το άζωτο έχει γίνει το αέριο επιλογής για τις περισσότερες εφαρμογές ψυχρού ψεκασμού που απαιτούν ανάντη εξοπλισμό έγχυσης, προφανώς αναγκάζοντας τους εφαρμοστές να αντισταθμίσουν τα οφέλη της χαμηλής πυκνότητας του ηλίου με τη λειτουργία τους με άζωτο σε ακραίες υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Μια άλλη πρόκληση στην ανάντη έγχυση περιλαμβάνει την τάση των σωματιδίων να διαβρώνουν το λαιμό του ακροφυσίου καθώς αυτά προωθούνται μέσω του θερμού αερίου. Επομένως, οι λαιμοί των ακροφυσίων θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από υλικά ανθεκτικά στη φθορά, τα οποία τελικά φθείρονται. Επιπλέον, λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών

λειτουργίας του ακροφυσίου, ο φραγμός του ακροφυσίου πρέπει να ελέγχεται στενά με ψύξη με νερό του σωλήνα ακροφυσίου.

Η θέρμανση των πεπιεσμένων αερίων σε σχετικά μεγάλους όγκους ροής αερίου απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη σχεδίαση του θερμαντήρα αερίου. Λόγω του απαιτούμενου μεγέθους του θερμαντήρα, τυπικά, οι θερμαντήρες αερίου στα συστήματα ανάντη ψεκασμού είναι εξωτερικά του πιστολιού ή λειτουργούν σε συνδυασμό με έναν βοηθητικό θερμαντήρα τοποθετημένο μέσα στο πιστόλι ψεκασμού. Μία πρόκληση με τον εξωτερικό εξωτερικό θερμαντήρα είναι ο σχεδιασμός εύκαμπτων αγωγών απαραίτητων για την παροχή του θερμού αερίου υπό πίεση στο πιστόλι. Ένα αέριο που μπορεί να βρίσκεται στο 70 bar και 1000 ° C, εκτός φυσικά από τις απώλειες θερμότητας και πίεσης που θα προκύπταν κατά τη διάρκεια της μεταφοράς.

Ως εκ τούτου, σε αυτές τις παραμέτρους, ως καλύτερη επιλογή φαίνεται ένα σύστημα θέρμανσης με ένα εύκαμπτο θερμαντήρα ακριβώς πάνω στο όπλο. Ένας μεγάλος θερμαντήρας στο πιστόλι καθιστά το εργαλείο δύσκολο στο χειρισμό ακόμη και ρομποτικά. Αυτό επίσης περιορίζει την ικανότητα του όπλου να εισέλθει σε δύσκολους χώρους πρόσβασης. Οι ειδικές διαμορφώσεις ακροφυσίων έχουν σχεδιαστεί για πρόσβαση σε τοποθεσίες όπως σφιχτές εσωτερικές διαμέτρους. Οι Impact Innovations (2014), Plasma Giken (2014), Oerlikon Metco (2014) και VRC Metal Systems (VRC 2014) επέτρεψαν την παραγωγή εμπορικών συστημάτων ανάντη έγχυσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά και χωρητικότητες. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν σε πιέσεις μέχρι 70 bar που παρέχουν θερμοκρασίες αερίου μέχρι 1100 ° C με κατανάλωση ενέργειας από περίπου 34 έως 70 kW.

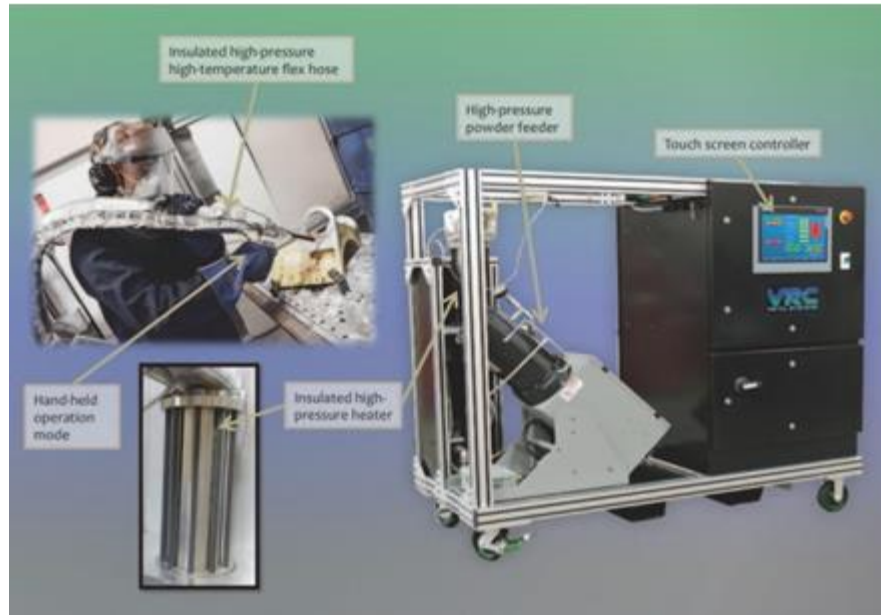
Ο ανάντη εξοπλισμός έγχυσης είναι τυπικά λιγότερο κινητός από ό, τι ο εξοπλισμός κατάντη έγχυσης απλά λόγω της πολυπλοκότητας των προδιαγραφών του εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους του πυροβόλου όπλου που απαιτείται για να λειτουργεί σε υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια, η ανάντη έγχυση έχει παραδοσιακά χρησιμοποιηθεί ως σταθερό εργαλείο για την ψεκασμό ειδικών υλικών που απαιτούν υψηλές ταχύτητες πρόσκρουσης για συγκόλληση. Πιο πρόσφατα, ορισμένοι κατασκευαστές ανέπτυξαν φορητό ανάντη σύστημα έγχυσης, υποβαθμίζοντας τις σχεδιαστικές πιέσεις (20 bar) και τις θερμοκρασίες (400 ° C), έτσι ώστε να περιοριστεί το εύρος των υλικών που μπορούν να ψεκαστούν. Άλλοι ανέπτυξαν ανάντη συστήματα έγχυσης με ένα ελαφρύτερο πιστόλι ψεκασμού αφαιρώντας εντελώς τον θερμαντήρα αερίου από το σώμα του πιστολιού. Παραδείγματα εμπορικά διαθέσιμων ανάντη συστημάτων έγχυσης που απεικονίζουν διάφορες διαμορφώσεις σχεδιασμού απεικονίζονται στα Σχ. 34, 35 και 36.



Σχήμα 34 Σύστημα ψεκασμού με ανάντη έγχυση (40 kW / 50 bar / 1100 ° C) που δείχνει τη μονάδα ελέγχου, το τροφοδότη σκόνης και το σύστημα ψεκασμού 40 kW. (Impact Innovations 2014)



Σχήμα 35 Σύστημα έγχυσης ανάντη (70 kW / 50 bar / 1000 ° C) που δείχνει το σύστημα ψεκασμού 70 kW. (Plasma Giken Co.)



Σχήμα 36 Σύστημα έγχυσης ανάντη (15-45 KW / 70 bar / 900 ° C) που απεικονίζει το πιστόλι ψεκασμού που συνδέεται με τον απομακρυσμένο θερμαντήρα αερίου τόσο για λειτουργίες ρομπότ όσο και χειρός. (VRC Metal Systems)

## 4.2 Αυτοματισμοί της διαδικασίας cold spray

### 4.2.1 Βιομηχανικός αυτοματισμός

Ο βιομηχανικός αυτοματισμός αναφέρεται στη χρήση μηχανικών συσκευών χωρίς ή με τον έλεγχο ενός ανθρώπινου χειριστή για την ολοκλήρωση επαναλαμβανόμενων κατασκευαστικών εργασιών. Εδώ και πολλά χρόνια, από την εφαρμογή των πρώτων υπολογιστικών συστημάτων στην κατασκευή, ο βιομηχανικός αυτοματισμός έχει γίνει σταθερά ένα θεμελιώδες στοιχείο των σημερινών διαδικασιών παραγωγής. Ένας ισχυρός οδηγός αυτής της τάσης είναι το γεγονός ότι υπολογιστές ή προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC) που οδηγούν μηχανικές συσκευές είναι σε θέση να εκτελούν επαναλαμβανόμενα καθήκοντα ταχύτερα και αποτελεσματικότερα από τους ανθρώπινους χειριστές, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της παραγωγικότητας και της συνέπειας.

Ο αυτοματισμός μπορεί να υιοθετήσει πολλές μορφές από μια απλή γραμμική μονάδα μονού άξονα σε κέντρα πολλαπλών αξόνων κίνηση μέσω ψηφιακού ελέγχου υπολογιστών (CNC). Ο εξειδικευμένος αυτοματισμός είναι γενικά σχεδιασμένος για να εκτελεί μόνο ή πολλαπλούς στόχους με σκοπό την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης διαδικασίας ακολουθώντας ένα συγκεκριμένο μοτίβο. Από την άλλη πλευρά, η ευέλικτη αυτοματοποίηση έχει τη δυνατότητα να



επαναπρογραμματιστεί για να κάνει πολλές άλλες λειτουργίες εντελώς διαφορετικές από τις αρχικές της εργασίες.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της αυτοματοποίησης είναι:

- Αυξημένη παραγωγικότητα εξαλείφοντας την εξάρτηση της παραγωγής από το πόσο ειδικευμένη ή / και τη συναισθηματική κατάσταση του χειριστή.
- Βελτιωμένη ποιότητα αφαιρώντας το στοιχείο ανθρώπινου σφάλματος.
- Αύξηση της συνέπειας της διαδικασίας και / ή του προϊόντος, επιτρέποντας στην αυτοματοποίηση να κάνει επαναλαμβανόμενες κινήσεις ή να επεξεργάζεται πιο σταθερά.
- Μείωση των άμεσων δαπανών εργασίας.

Τα κύρια μειονεκτήματα του αυτοματισμού είναι:

- Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα μπορεί να έχει περιορισμένο επίπεδο νοημοσύνης και ως εκ τούτου είναι πιο επιρρεπές σε σφάλματα εκτός του άμεσου πεδίου γνώσης του.
- Απρόβλεπτα έξοδα ανάπτυξης.
- Το κόστος αυτοματισμού για ένα νέο προϊόν ή εγκατάσταση απαιτεί συνήθως μια πολύ μεγάλη αρχική επένδυση σε σύγκριση με το μοναδιαίο κόστος του προϊόντος, αν και το κόστος αυτοματοποίησης μπορεί να εξαπλωθεί σε πολλά προϊόντα και με την πάροδο του χρόνου.
- Αυξημένη έμμεση εργασία για τη διατήρηση περισσότερης αυτοματοποίησης.

Στον τομέα της μεταποίησης, ο σκοπός της αυτοματοποίησης έχει μετατοπιστεί σε θέματα ευρύτερα από την παραγωγικότητα, το κόστος και το χρόνο. Έχει μετατοπιστεί για να επικεντρωθεί στην ποιότητα με συνέπεια και επαναληψιμότητα της διαδικασίας. Ως εκ τούτου, οι χρήστες έχουν ασκήσει πίεση στους προμηθευτές αυτοματισμού για την κατασκευή στοιχείων αυτοματισμού που είναι πιο ακριβή και συνεπή. Αυτή η τάση αντικατοπτρίστηκε επίσης στην περίπτωση ψεκασμού με ψεκασμό, καθώς οι χρήστες αυτής της τεχνολογίας απαιτούνται ολοένα και περισσότερο για να παράγουν συνεκτικότερες και υψηλότερης ποιότητας ψεκάσματα ψεκασμού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τον μεγαλύτερο έλεγχο των παραμέτρων της διαδικασίας ψεκασμού κρύου καθώς και με τον αυστηρότερο έλεγχο των χαρακτηριστικών του υλικού τροφοδοσίας, όπως περιγράφεται περαιτέρω στις επόμενες ενότητες.

#### 4.2.2 Αυτοματισμοί του ελέγχου διεργασιών cold spray

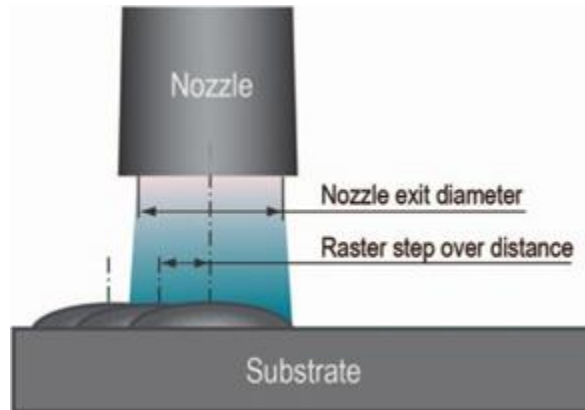
Ο έλεγχος μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας ψεκασμού μπορεί να επιτευχθεί με την παρακολούθηση και τον έλεγχο των παραμέτρων διεργασίας όπως η πίεση του αερίου, η θερμοκρασία του αερίου, ο ρυθμός τροφοδοσίας τροφοδοσίας και η ταχύτητα μετακίνησης του όπλου. Τα εμπορικά ψυκτικά συστήματα ψεκασμού χρησιμοποιούν μια σταθερή διάμετρο του λαιμού του ακροφυσίου DeLaval (ή "στόμιο"), το οποίο περιέχεται στο ίδιο το πιστόλι ψεκασμού. Αυτό το στόμιο λειτουργεί σε κατάσταση πνιγμού για τα διάφορα αέρια.

Ο πραγματικός ρυθμός ροής μάζας του φέροντος αερίου προσδιορίζεται από την πυκνότητα αερίου, την πίεση αερίου και τη θερμοκρασία αερίου. Επομένως, για να ελέγχεται η ροή μάζας αερίου για ένα δεδομένο αέριο, η πίεση και η θερμοκρασία πρέπει να ελέγχονται εντός ορισμένων ορίων ανοχής. Αυτό επιτυγχάνεται γενικά με την εφαρμογή ελέγχου κλειστού βρόχου με μετατροπείς πίεσης και θερμοστοιχεία στο κύκλωμα αερίου. Άλλες εναλλακτικές λύσεις περιλαμβάνουν την εφαρμογή ελέγχου κλειστού βρόχου χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή ροής μάζας και θερμοηλεκτρικές μονάδες.

Ο έλεγχος του ρυθμού τροφοδοσίας μπορεί να επιτευχθεί με ογκομετρική τροφοδοσία ή απώλεια βάρους της σκόνης ψεκασμού. Η ογκομετρική τροφοδοσία με σκόνη είναι η πιο κοινή τεχνική, καθώς είναι πιο οικονομική. Ωστόσο, η ογκομετρική τροφοδοσία τυπικά δεν είναι συνεπής και οι ρυθμοί ροής που παρακολουθούνται μπορεί να κυμαίνονται έως και 10% ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της σκόνης. Μία καλύτερη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας τροφοδοσίας περιλαμβάνει την τεχνική απώλειας βάρους, η οποία χρησιμοποιεί κυψέλες φορτίου για την παρακολούθηση του ρυθμού τροφοδοσίας και στη συνέχεια ελέγχει τον ρυθμό παράδοσης τροφοδοσίας για να διατηρήσει έναν πιο σταθερό ρυθμό τροφοδοσίας. Άλλες προτεινόμενες μέθοδοι περιλαμβάνουν τον έλεγχο της καταμέτρησης των σωματιδίων, που κατανέμονται εντός του συστήματος.

Η παρακολούθηση και ο έλεγχος της ταχύτητας μετακίνησης του όπλου και του βήματος ράστερ είναι επιθυμητά προκειμένου να παράγεται ομαλό φινίρισμα και σταθερό πάχος της εναπόθεσης. Η ταχύτητα μετακίνησης του όπλου, μαζί με την ταχύτητα τροφοδοσίας σκόνης, καθορίζει το πάχος της εναπόθεσης κατά τη διάρκεια μιας διέλευσης. Είναι γενικά επιθυμητό το εναποτιθέμενο πάχος να είναι εντός 0.13-0.5 mm ανά δίοδο. Η κίνηση πρέπει να δημιουργείται από έναν αυτοματοποιημένο μηχανισμό μετάδοσης κίνησης, ο οποίος μπορεί να είναι ικανός για έλεγχο ανατροφοδότησης κλειστού βρόχου.

Το βήμα του ράστερ είναι σημαντικό για τον καθορισμό της μεταβολής του πάχους ανά raster. Ανάλογα με την απαλότητα επιφάνειας που απαιτείται, το βήμα raster ρυθμίζεται συνήθως από 6 έως 50% της διαμέτρου εξόδου του ακροφυσίου (σχ. 37).



Σχήμα 37 Αναπαράσταση του βήματος ράστερ για να επιτευχθεί ομαλό φινίρισμα επιφάνειας με κρύο ψεκασμό

#### 4.2.3 Χειρισμός όπλου συσκευής

Υπάρχουν πολλοί δυνατοί συνδυασμοί αυτοματοποίησης της διαδικασίας ψεκασμού. Ακολουθούν ορισμένοι από τους πιο συνηθισμένους συνδυασμούς:

- Ενιαία γραμμική κίνηση για το όπλο με γραμμική κίνηση του υποστρώματος ή του τμήματος
- Μονή γραμμική κίνηση για το όπλο με περιστροφική κίνηση του υποστρώματος ή του τμήματος
- Πολλαπλού άξονα ρομποτικό χειρισμό του πιστολιού ή του υποστρώματος με ακίνητο υπόστρωμα ή τμήμα
- Πολλαπλού άξονα ρομποτικό χειρισμό του όπλου με χειρισμό υποστρώματος από βοηθητικό άξονα

Για μια ομαλή και σταθερή επίστρωση σε κυλινδρικά υποστρώματα, η χρήση γραμμικής κίνησης μεταβλητής ταχύτητας για το όπλο και η περιστροφική κίνηση μεταβλητής ταχύτητας για το υπόστρωμα είναι η πιο οικονομική μέθοδος για καλύτερα αποτελέσματα. Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη μόνο όταν το πάχος της επίστρωσης επιτρέπει μια μεγάλη ανοχή μεταβλητότητας. Ωστόσο, όταν η μεταβλητότητα του πάχους έχει ένα σφιχτό παράθυρο ανοχής, τότε θα χρειαστεί ένα σύστημα τροφοδοσίας σε δύο άξονες για το πιστόλι και το υπόστρωμα μαζί με ένα σύστημα τροφοδοσίας σκόνης με απώλεια βάρους.

Για τα υποστρώματα που έχουν περιμετρικό περίγραμμα, ο ρομποτικός χειρισμός πολλαπλών αξόνων του πιστολιού θα ήταν επιθυμητός για τις κινήσεις κλίσης, κίνησης και ράστερ (σχ. 38). Εάν η μεταβλητότητα του πάχους της επικάλυψης είναι κρίσιμη, τότε θα χρειαζόταν μια τροφοδοσία σκόνης με απώλεια βάρους.



*Σχήμα 38 Ρομποτικό όπλο ψυχρού ψεκασμού τοποθετημένο σε τυπικό βιομηχανικό ρομποτικό βραχίονα (CenterLine (Windsor) Limited)*

Ένα πιο εξελιγμένο επίπεδο αυτοματισμού αποτελείται από ένα όπλο που είναι τοποθετημένο σε ρομποτικό βραχίονα πολλαπλών αξόνων με το υπόστρωμα ή το τμήμα τοποθετημένο σε έναν μονόδρομο ή δύο αξόνων με συντονισμένο έλεγχο από τον ελεγκτή ρομπότ. Γενικά, ο χειριστής υποστρώματος έχει έναν άξονα περιστροφής και έναν άξονα κλίσης. Ο άξονας περιστροφής μπορεί να λειτουργεί είτε σε συνεχή περιστροφή είτε σε περιστροφική θέση. Ο άξονας κλίσης έχει γενικά 90 ° ελευθερία από κάθετη σε οριζόντια θέση ως συντονισμένος άξονας με τον ελεγκτή ρομπότ (σχ. 39).



Σχήμα 39 Ρομποτικό όπλο ψυχρού ψεκασμού τοποθετημένο σε τυπικό βιομηχανικό ρομποτικό βραχίονα με το υπόστρωμα τοποθετημένο σε βραχίονά δύο βαθμών ελευθερίας (Able Engineering)

#### 4.2.4 Αυτοματισμοί ασφαλείας

Η ασφάλεια του χειριστή αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο κατά τη λειτουργία οποιουδήποτε συστήματος ψυχρού ψεκασμού για χειροκίνητη ή πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία. Συγκεκριμένα, για κάθε σύστημα ψεκασμού που λειτουργεί σε περιορισμένη περιοχή, απαιτείται η τοποθέτηση ασφαλειών για την ασφάλεια του χειριστή. Στην πράξη, τόσο τα χειροκίνητα όσο και τα αυτόματα συστήματα ψεκασμού ψύξης τυπικά αλληλοσυνδέονται με το σύστημα συλλογής σκόνης. Σε αυτή τη διαμόρφωση, το ψυχρό σύστημα ψεκασμού δεν θα λειτουργήσει εκτός εάν το σύστημα συλλογής σκόνης λειτουργεί σωστά. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, αλλά ο πιο αποδεκτός τρόπος είναι να παρακολουθείται η διαφορά πίεσης στην ανάντη πλευρά του συστήματος φιλτραρίσματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί παρακολουθώντας τη διαφορά πίεσης μεταξύ του συλλέκτη σκόνης και της πίεσης περιβάλλοντος με τη χρήση κατάλληλου αισθητήρα διαφοράς πίεσης. Αν η διαφορά πίεσης είναι πάνω ή κάτω από κάποιο όριο, το ψυχρό σύστημα ψεκασμού δεν θα λειτουργήσει.

Για οποιοδήποτε είδος αυτοματισμού, υπάρχουν πάντοτε κανονισμοί ασφαλείας για την περιοχή όπου λειτουργεί, οι οποίοι περιορίζουν την άμεση ανθρώπινη παρέμβαση. Η εφαρμογή αυτών των κανονισμών επιτυγχάνεται με τη σωστή εγκατάσταση φυσικών ή ηλεκτρονικών φραγμών, συμπεριλαμβανομένων φυσικών θυρών, περιφράξεων ή / και οπτοηλεκτρονικών συσκευών (κουρτίνες) που χρησιμοποιούνται για την προστασία προσωπικού κοντά σε κινούμενα μηχανήματα που μπορούν να προκαλέσουν βλάβη. Όλες οι μορφές θυρών και ανοιγμάτων περιβλήματος πρέπει να αλληλοσυνδέονται με εγκεκριμένες διατάξεις ασφαλείας. Αυτές οι συσκευές, κανονικά διακόπτες ασφαλείας, πρέπει να αλληλοσυνδέονται με το κύκλωμα διακοπής "E" αυτοματισμού (σχ. 40).



*Σχήμα 40 Διακόπτης ασφαλείας που χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση εισόδου προσωπικού σε ενεργά αυτόματα μηχανήματα*

Το σύστημα τροφοδοσίας σκόνης πρέπει να ασφαλιζεται με το σύστημα ελέγχου, ώστε να διασφαλίζεται ότι μπορεί να ελέγχεται η κατάλληλη ακολουθία έναρξης / διακοπής της λειτουργίας. Η ακολουθία εκκίνησης της λειτουργίας αποτελείται από την εκκίνηση ροής αερίου ακολουθούμενη από την ενεργοποίηση της θέρμανσης αερίου. Όταν το αέριο φτάσει σε λειτουργική θερμοκρασία, τότε μπορεί να αρχίσει η τροφοδοσία σε σκόνη. Αν δεν ακολουθηθεί αυτή η διαδικασία, υπάρχει πιθανότητα να τροφοδοτηθεί σκόνη που μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημιά στο σύστημα. Η διαδικασία τερματισμού θα πρέπει να είναι σε αντίστροφη σειρά της εκκίνησης.

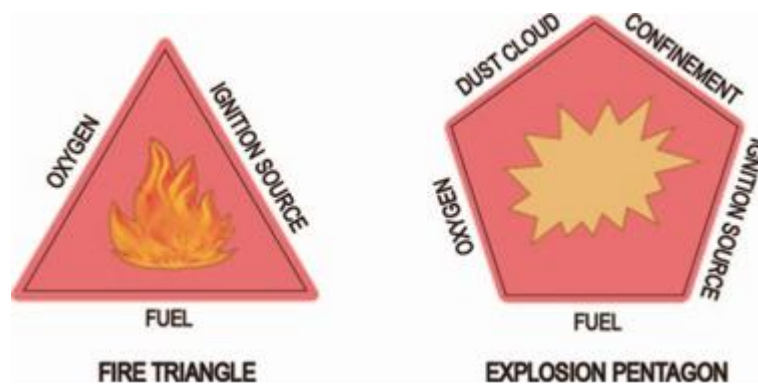
Τέλος, το σύστημα συλλογής σκόνης πρέπει να αλληλοσυνδεθεί με τον κρύο έλεγχο ψεκασμού. Ο έλεγχος ψύξης με κρύο σύστημα δεν πρέπει να λειτουργεί έως ότου ενεργοποιηθεί το σύστημα συλλογής σκόνης και λειτουργεί μέχρι καθορισμένο επίπεδο απόδοσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφορικού διακόπτη πίεσης / διαμέτρου για την παρακολούθηση της διαφοράς πίεσης στο τμήμα ανάντη του συλλέκτη σκόνης. Οι περισσότεροι συλλέκτες σκόνης λειτουργούν αποτελεσματικά στο 0,010-0,017 bar (4-7 "στήλη νερού). Ένα κρύο σύστημα ψεκασμού δεν θα πρέπει να λειτουργεί αν η διαφορά πίεσης πέφτει έξω από αυτό το όριο.

Μια έκρηξη μπορεί να προκληθεί από ξαφνική χημική αντίδραση μεταξύ οποιουδήποτε καυσίμου υλικού και οξυγόνου που υπάρχει στην κανονική ατμόσφαιρα σε ένα περιορισμένο περιβάλλον. Οι οργανικές και / ή ανόργανες καύσιμες σκόνης αιωρούμενες στον αέρα είναι επιρρεπείς σε πυρκαγιά ή εκρήξεις καθώς μεγιστοποιείται η ποσότητα επιφάνειας για οξείδωση. Εκτός από πολύτιμα μέταλλα, τα περισσότερα μέταλλα έχουν την τάση να αντιδρούν με το οξυγόνο που

υπάρχει στον αέρα, σε διάφορα επίπεδα. Συνεπώς, η μεταλλική σκόνη που αναρτάται στην ατμόσφαιρα ενδέχεται να αποτελεί κίνδυνο πυρκαγιάς ή έκρηξης, εάν πληρούνται οι ακόλουθες τρεις βασικές προϋποθέσεις.

1. Η τοπική συγκέντρωση του εύφλεκτου υλικού πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να παράγει ένα αναφλέξιμο μείγμα.
2. Η ποσότητα οξυγόνου στην περιοχή πρέπει να είναι σε επαρκή ποσότητα γύρω από το εύφλεκτο υλικό για να προκαλέσει πυρκαγιά.
3. Πρέπει να υπάρχει πηγή ανάφλεξης με εκτεθειμένη φλόγα, σπινθήρα ή υψηλή θερμότητα. Επιπλέον, για να υπάρξει έκρηξη, απαιτούνται τα ακόλουθα πρόσθετα στοιχεία:
4. Μεταλλική σκόνη σε αρκετά υψηλή πυκνότητα.
5. Το σύννεφο σκόνης πρέπει να υπάρχει σε περιορισμένη περιοχή.

Η παρουσία αυτών των πέντε στοιχείων αποτελεί τις πλευρές αυτού που είναι γνωστό ως το πεντάγωνο έκρηξης. Αν κάποιο από τα πέντε στοιχεία λείπει, δεν θα υπάρξει έκρηξη. Και τα πέντε στοιχεία πρέπει να υπάρχουν ταυτόχρονα για να συμβούν εκρήξεις (σχ. 41).



Σχήμα 41 Θεμελιώδεις παράγοντες για την εμφάνιση πυρκαγιών ή εκρήξεων

Η διαδικασία ψυχρού ψεκασμού παρέχει μια μεταλλική σκόνη σε ένα φέρον αέριο σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο τήξης του ψεκασθέντος υλικού. Τα αέρια μεταφοράς μπορούν να είναι είτε ήλιο, άζωτο ή αέρας. Η σκόνη ψεκασμού κανονικά ψεκάζεται σε ατμόσφαιρα αέρα. Εκτός από πολύτιμα μέταλλα, όλες οι μεταλλικές σκόνες είναι εύφλεκτες, πράγμα που σημαίνει ότι θα μπορούσαν να αντιδρούν με το οξυγόνο, κρατώντας μια διαδικασία καύσης σε κάποιο επίπεδο. Εάν η πυκνότητα της σκόνης γύρω από την περιοχή ψεκασμού είναι πάνω από ένα όριο (ελάχιστη εκρηκτική συγκέντρωση, MEC), υπάρχει αρκετό οξυγόνο στη γύρω ατμόσφαιρα, η θέση είναι περιορισμένη και υπάρχει πηγή ανάφλεξης, τότε το μείγμα μπορεί να εκραγεί .

Οι ζώνες ψυχρού ψεκασμού που έχουν πιθανότητα έκρηξης ταξινομούνται ως επικίνδυνες περιοχές από τους διάφορους κωδικούς ασφαλείας. Στη Βόρειο Αμερική, οι περιοχές αυτές ορίζονται ως κλάση 2, τμήμα 1, ομάδα E, όπου υπάρχει ή αναμένεται να υπάρχει φυσικό αέριο, ατμός ή ομίχλη για μεγάλες χρονικές περιόδους υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός που πρέπει να λειτουργεί σε τέτοια περιβάλλοντα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένος και δοκιμασμένος ώστε να μην προκαλεί έκρηξη λόγω πηγής ανάφλεξης ή υψηλής θερμοκρασίας επιφανείας.

Στην Ευρώπη και στην υπόλοιπη παγκόσμια κοινότητα, οι επικίνδυνες τοποθεσίες για ψεκασμό ψεκασμού χαρακτηρίζονται από τα πειράματα αιολικού εμπορίου (ATEX) και από το πρόγραμμα της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής για την πιστοποίηση των προτύπων που αφορούν τον εξοπλισμό για χρήση σε εκρηκτικές ατμόσφαιρες σύμφωνα με το κώδικα της International Electrotechnical Commission Explosive (IECEx) ως Ζώνη 21 Ομάδα IIIC, ανάλογα με τις περιστάσεις, όπου η ονομασία ζώνης αναφέρεται σε μια περιοχή στην οποία είναι πιθανό να υπάρχει ένα εκρηκτικό μείγμα κατά την κανονική λειτουργία.

Για να εξαλειφθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς ή έκρηξης, οι χρήστες ψυχρού ψεκασμού μπορούν να ακολουθήσουν τις οδηγίες της Εθνικής Ένωσης Πυροπροστασίας (NFPA), μιας διεθνούς μη κερδοσκοπικής ομάδας με 75.000 μέλη από 100 έθνη. Οι ακόλουθες οδηγίες ισχύουν για τις εργασίες ψυχρής ψεκασμού: πρότυπο NFPA 654, για την πρόληψη έκρηξης πυρκαγιάς και σκόνης από την παραγωγή, επεξεργασία και χειρισμό καυσίμων στερεών σωματιδίων. Πρότυπο NFPA 484, για εύφλεκτα μέταλλα-2015. Πρότυπο NFPA 33, για εφαρμογές ψεκασμού με εύφλεκτο ή καύσιμο υλικό 2011. Πρότυπο NFPA 69, για συστήματα πρόληψης έκρηξης. Και NFPA 70, ο Εθνικός Ηλεκτρικός Κώδικας®. Υπάρχουν και άλλες ομάδες που δημοσιεύουν κανονισμούς και κατευθυντήριες γραμμές για την πρόληψη και την ασφάλεια των πυρκαγιών, συμπεριλαμβανομένης του Οργανισμού της Ασφάλειας και Υγείας (OSHA), του Ομοιόμορφου Κώδικα Πυρκαγιάς και του Αμερικανικού Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων. Ωστόσο, τα τοπικά ρυθμιστικά όργανα πυρόσβεσης και ασφάλειας της περιοχής στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί ένα ψυχρό σύστημα ψεκασμού έχουν τον απόλυτο λόγο σχετικά με τις συγκεκριμένες προφυλάξεις, τους κανόνες ή τους κωδικούς σχεδιασμού που πρέπει να ακολουθούνται για να επιτρέπεται η λειτουργία μιας εγκατάστασης ψυχρού ψεκασμού στην περιοχή. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, πρέπει να ακολουθείται η οδηγία ATEX 94/9 / EC για κάθε εγκατάσταση εξοπλισμού κρύου ψεκασμού που λειτουργεί στην περιοχή.



Ο πρωταρχικός στόχος μιας ασφαλούς και επιτυχημένης εγκατάστασης ψυχρού ψεκασμού είναι να αφαιρέσει τουλάχιστον μία από τις συνθήκες που μπορεί να οδηγήσουν σε πιθανές εκρήξεις. Μία μέθοδος είναι να μειωθεί το επίπεδο συγκέντρωσης μεταλλικής σκόνης στην επικίνδυνη ζώνη κάτω από πολύ χαμηλότερο από το ελάχιστο επίπεδο συγκέντρωσης έκρηξης (MEC). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αραίωση της συγκέντρωσης μεταλλικής σκόνης στην επικίνδυνη ζώνη χρησιμοποιώντας επαρκή στρατηγική αποστράγγισης και σωστή συλλογή σκόνης. Για παράδειγμα, οι ολοκληρωτές θα μπορούσαν να διαχωρίσουν τον όγκο εκχύλισης του συλλέκτη σκόνης για να παράγουν ένα συντελεστή ασφαλείας, τουλάχιστον δέκα φορές κάτω από το επίπεδο MEC της ψεκασμένης σκόνης. Ένας άλλος σχετικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος συλλογής σκόνης είναι η ταχύτητα της κίνησης του αέρα στην επιφάνεια εργασίας και στον αγωγό στον συλλέκτη σκόνης. Η ταχύτητα στην εργασία εντός των αγωγών πρέπει να είναι επαρκής ώστε να κρατήσει τα σωματίδια σκόνης σε αεροστεγή κατάσταση και να μην εγκατασταθεί στην εργασία αγωγών.

Μια πρόσθετη σύσταση είναι να εξαλειφθούν οι πηγές ανάφλεξης, ειδικά στον ηλεκτρικό εξοπλισμό που περιέχει διακόπτες, χρησιμοποιώντας εγγενείς φραγμούς που μετριάζουν τη δυνατότητα δημιουργίας σπινθήρων όταν οι επαφές γίνονται ή σπάνε.

Οι ακόλουθες συστάσεις προέρχονται από το NFPA 484-15:

**A.9.4.10.2** Τυπικά, οι ελάχιστες ταχύτητες μεταφοράς κυμαίνονται από 1078 m / min (3500 πόδια / λεπτό) έως 1372 m / min (4500 ft / min) ανάλογα με το υλικό που μεταφέρεται (ACGIH 2013).

**A.9.4.10.3** Το Γραφείο των Ορυχείων των ΗΠΑ, RI 6516, "Εκρηκτικότητα των Μεταλλικών Σκονών", αναφέρει τα αποτελέσματα δοκιμών που έγιναν σε 89 δείγματα μεταλλικών σκονών διαφόρων βαθμών και μεγεθών. Οι ελάχιστες ενέργειες ανάφλεξης (MIEs) για νέφη σκόνης κυμαίνονταν έως 15 mJ, ενώ τα MIE για στρώματα σκόνης κυμαίνονταν από 15 mJ. Οι θερμοκρασίες ανάφλεξης κυμαίνονταν από 320 ° C (608 ° F). Τα MEC κυμαίνονταν από 40 g / m<sup>3</sup> (0.040 oz / ft<sup>3</sup>). Οι μέγιστες πιέσεις έκρηξης μπορούν να υπερβούν μια πίεση μετρητή 620 kPa (90 psi). Η ελάχιστη ταχύτητα στην επιφάνεια εργασίας έχει καθοριστεί σε 46 m / min (150 πόδια / λεπτό), αλλά μια ασφαλή πρακτική σχεδίασης είναι να προσπαθήσουμε για τα 76,2 m / min (250 ft / min). Η χρήση είτε σφραγισμένων είτε πεπιεσμένων θαλάμων ελέγχου που έχουν εγκριθεί για επικίνδυνες περιοχές θα μετριάσει κάθε πιθανότητα μεταλλικής σκόνης να φτάσει στα εσωτερικά ηλεκτρικά εξαρτήματά τους. Τα επίπεδα πίεσης στα ερμάρια και τα όπλα ελέγχου υπό πίεση θα πρέπει να παρακολουθούνται με ένα διαφορικό διακόπτη πίεσης / μετρητή. Το ελάχιστο

όριο διαφοράς πίεσης πρέπει να είναι 2,54 cm (1 ") νερό (0,002 bar). Κάτω από αυτό το επίπεδο, ένα σύστημα ελέγχου ψεκασμού ψύξης θα πρέπει να κλείσει.

Τέλος, οι κατασκευαστές και οι εγκαταστάτες ψυκτικών συστημάτων ψεκασμού θα πρέπει να ελαχιστοποιούν τη συσσώρευση στατικού φορτίου γειώνοντας όλα τα εξαρτήματα, κατά περίπτωση, ειδικά σε κρίσιμες ζώνες. Για παράδειγμα, όλες οι μη μεταλλικές γραμμές τροφοδοσίας σκόνης πρέπει να είναι κατασκευασμένες από σωληνώσεις στατικής διάχυσης που είναι σωστά γειωμένες. Το κομμάτι εργασίας και η επιφάνεια εργασίας πρέπει επίσης να γειώνονται. Όλα τα εξαρτήματα μεταφοράς πεπιεσμένου αέρα από την επιφάνεια εργασίας στο συλλέκτη σκόνης πρέπει επίσης να είναι γειωμένα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

η παρούσα εργασία διερεύνησε την τεχνολογία κρύου ψεκασμού στο πλαίσιο της πολύ ευρύτερης οικογένειας θερμικών ψεκασμών, των αρχών αυτής καθώς και των σχετικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών του. Είναι πράγματι, τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά, δυνατή η χρήση της μεθόδου ψυχρού ψεκασμού ως μέθοδος για την επίλυση ορισμένων σύγχρονων προκλήσεων της επιφάνειας, όπως η ανακύκλωση, ο κύκλος ζωής, η επανακατασκευή, οι εκπομπές, η κατανάλωση ενέργειας και η φιλικότητα προς το περιβάλλον.

Ο ψυχρός ψεκασμός παρουσιάστηκε ως αμφισβήτηση στις παραδοσιακές προσεγγίσεις επίλυσης προβλημάτων, εφιστώντας την προσοχή στην ανάγκη για νέες μεθόδους που επιτρέπουν τη συνέχιση της ανάπτυξης και εφαρμογής προηγμένων υλικών για εφαρμογές αεροδιαστημικής, ηλεκτρονικής, τεχνολογίας της πληροφορίας, ενέργειας, οπτικής, τριβολογίας και βιοτεχνολογίας.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του ψυχρού ψεκασμού μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Δεν υπάρχει κίνδυνος για την τήξη της σκόνης
- Δεν υπάρχει ανάπτυξη συσσωματωμάτων
- Δεν υπάρχουν αλλαγές φάσης
- Ελάχιστη θερμική εισαγωγή στο υπόστρωμα
- Δεν υπάρχει οξειδωση
- Υψηλή πυκνότητα, χαμηλό πορώδες
- Υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Δύναμη συγκόλλησης
- Υπολειπόμενες τάσεις συμπίεσης
- Ανθεκτικότητα στη διάβρωση
- Δεν υπάρχει ανάγκη για μηχανική απομόνωση περιοχής επεξεργασίας
- Ευελιξία στην επιλογή συνδυασμού επίστρωσης-υποστρώματος
- Σύζευξη Ανόμοιων Υλικών
- Εξαιρετικά παχιά επίστρωση
- Υψηλή απόδοση αποθέσεως
- Φιλική διεργασία για το περιβάλλον, την υγεία και την ασφάλεια

Αντίστοιχα τα βασικά μειονεκτήματα της διεργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Σχεδόν μηδενική ολκιμότητα
- Περιορισμένη γκάμα υλικών ψεκασμού
- Το υλικό υποστρώματος πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικό σε κρούσεις (υψηλή σκληρότητα)
- Κατανάλωση αερίου
- Επεξεργασία μόνο στην γραμμή της όρασης
- Περιορισμένη διαθεσιμότητα των τυποποιημένων προδιαγραφών

## BIBΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ACGIH. 2013. Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Oxford: Elsevier.
- Ajdelsztajn L., Zuññiga A., Jodoin B. and Lavernia E.J., (2006), Cold gas dynamic spraying of a high temperature Al alloy; *Surface & Coatings Technology* 201, Elsevier B.V, pp 2109 - 2116
- Ajdelsztajn L., Jodoin B, Kim G. E., and Schoenung J. M., (2005), Cold Spray Deposition of Nanocrystalline Aluminum Alloys; *Metallurgical And Materials Transactions A*, 658- Volume 36a, pp 657 - 666
- Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H., (2003), Bonding mechanism in cold gas spraying; *Acta Materialia* 51, Elsevier Ltd., pp 4379 - 4394
- Balani K., Agarwal A., Seal S., Karthikeyan J., (2005a), Transmission electron microscopy of cold sprayed 1100 aluminum coating , *Scripta Materialia* 53, Elsevier Ltd., pp 845 - 850
- Balani K., Laha T., Agarwal A., Karthikeyan J., and Munroe N., (2005b), Effect of carrier gases on microstructural and electrochemical behavior of cold-sprayed 1100 aluminum coating; *Surface & Coatings Technology* 195, Elsevier B.V., pp 272 – 279
- Berndt, C. 2004a. Feedstock material considerations. In *Handbook of thermal spray technology*, ed. J. R. Davis, 137–141. Materials Park: TSS/ASM International
- Berndt, C. 2004b. Material production process. In *Handbook of thermal spray technology*, ed. J.R. Davis, 147–158. Materials Park: TSS/ASM International
- Cadney S., Brochu M., Richer P. and Jodoin B., (2008), Cold gas dynamic spraying as a method for freeforming and joining materials; *Surface & Coatings Technology* 202, Elsevier B.V., pp 2801 - 2806

- CenterLine (Windsor) Limited. 2015. <http://www.supersonicspray.com/>. Accessed 23 Jan 2015. Dymet Corporation. 2014. <http://dymet.info/indexe.html>. Accessed 7 July 2014.
- Champagne V.K., (2007), Cold Spray: An Emerging Technology; The ASM Thermal Spray Society Workshop on Cold Spray Technology, Army Research Laboratory, pp 1 - 38
- Champagne V., Helfritch D., Leyman P., Lempicki R. and Grendahl S, (2005a), The effects of gas and metal characteristics on sprayed metal coatings, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 13, US Army Research Laboratory, Aberdeen, USA, IOP, pp 1119 - 1128
- Champagne V.K., Helfritch D. Jr., Leyman P, Grendahl S, and Klotz B, (2005b), Interface material mixing formed by the Deposition of Copper on Aluminum by Means of the cold spray process; Journal of Thermal Spray Technology Volume 14(3), ASM International, pp 330 – 334
- Crawmer, D. 2004. Process control equipment. In Handbook of thermal spray technology, ed. J. R.Davis, 85–98. Materials Park: TSS/ASM International
- Cullity, B. D., and S. R. Stock. 2001. Elements of X-ray diffraction. New York: Prentice Hall
- Davis, J. R. 2004. Handbook of thermal spray technology. Ohio: TSS/ASM International
- Gärtner F., Schmidt T., Stoltenhoff T., and Kreye H., (2006a), Recent Developments and Potential Applications of Cold Spraying, Helmut Schmidt University, Hamburg, Germany, ASM International, pp 1 – 9
- Gärtner F., Stoltenhoff T., Voyer J., Kreye H., Riekehr S. and Koçak M., (2006b), Mechanical properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings; Surface & Coatings Technology 200, Elsevier B.V., pp 6770 - 6782

- Grujicic M., Zhao C. L., Tong C., DeRosset W. S. and Helfritch D., (2004) Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process; Materials Science and Engineering A368, Elsevier B.V., pp 222 – 230
- Grujicic M., Tong C., DeRosset W. S., and Helfritch D., (2003), Flow analysis and nozzle-shape optimisation for the cold-gas dynamic-spray process; Department of Mechanical Engineering, Clemson University, Clemson, USA, IMechE, pp 1603 - 1613
- Impact Innovations. 2014. [http://www.impact-innovations.com/en/coldgas/cg\\_index\\_en.html](http://www.impact-innovations.com/en/coldgas/cg_index_en.html). Accessed 29 July 2014.
- Karthikeyan J., (2007), Development of Oxidation Resistant Coatings on GRCop-84 Substrates by Cold Spray Process; Barberton, Ohio; ASB Industries, Inc., pp 1 - 16
- Karthikeyan J., (2004), Cold Spray Technology: International Status and USA Efforts, Barberton, Ohio; ASB Industries Inc, pp 1 - 14
- Kashirin A.I., Klyuev O.F. and Buzdygar T.V., (2002), Apparatus for gas-dynamic coating; United States Patent, US 6 402 050 B1, pp 1 - 4
- Klar, E., and W. M. Shafer. 1972. In Powder metallurgy for high-performance applications, eds. J.J. Burke, and V. Weiss, 57. New York: Syracuse University Press
- Klinkov S.V., Kosarev V.F. and Rein M., (2005), Cold spray deposition: Significance of particle impact phenomena; Aerospace Science and Technology 9, Elsevier SAS., pp 582 -591
- Lee H., Lee S., Shin H. and Ko K., (2009), Mechanical matching and microstructural evolution at the coating/substrate interfaces of cold-sprayed Ni, Al coatings; Journal of Alloys and Compounds, Elsevier B.V., pp 1 - 6
- Lee J. C., Kang H. J., Chu W. S., and Ahn S. H., (2007), Repair of Damaged Mold Surface by Cold-Spray Method; Annals of the CIRP Vol. 56/1, pp 577 - 580

- Li W.-Y., Zhang C., Guo X.P., Zhang G., Liao H. L., Li C.-J., and Coddet C., (2008), Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying; *Materials and Design* 29, Elsevier Ltd., 297 – 304
- Li, C.-J., W.-Y. Li, and H. Liao. 2006. Examination of the critical velocity for deposition of particles in cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology* 15 (2): 212–222
- Li, C.-J., G.-J. Yang, and H.T. Wang. 2007a. Manufacturing method of intermetallics coatings. ZL 2007 10017976.X Chinese patent.
- Li, C.-J., G.-J. Yang, P.-H. Gao, J. Ma, Y.-Y. Wang, and C.-X. Li. 2007b. Characterization of nanostructured WC-Co deposited by cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology* 16 (5/6): 1011–1020.
- Lima R.S., Kucuk A. and Berndt C.C., (2002), Deposition efficiency, mechanical properties and coating roughness in cold-sprayed titanium; Department of Materials Science and Engineering, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, USA, Kluwer Academic Publishers, pp 1 - 3
- Maev R. Gr. and Leshchynsky V., (2008), Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray, Physics and Technology, Weinheim: Wiley-VCH.
- McCune R.C., Donlon W.T., Popoola O.O., and Cartwright E.L., (2000), Characterization of Copper Layers Produced by Cold Gas-Dynamic Spraying, Volume 9(1) March 2000-73, ASM International
- Oerlikon Metco. 2014. <http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/systems/cold-spray/>. Accessed 29 July 2014.
- Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A. and Fomin V., (2007), Cold Spray Technology; Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanical of Russian Academy of Science in Novosibirsk, Russia; London : Elsevier.
- Papyrin A.N., (2006), Cold Spray: State of the art and applications; Cold Spray Technology, Albuquerque, NM, USA, pp 1 - 21



- Pattison J., Celotto S., Morgan R., Khan A. and O'Neill W., (2007a), Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process, *Surface & Coatings Technology*, pp 1 -12
- Pattison J., Celotto S., Morgan R., Bray M and O'Neill. W., (2007b), Cold gas dynamic manufacturing: A non-thermal approach to freeform fabrication; *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, Elsevier Ltd, pp 627 - 634
- Pawlowski, L. 2008. *The science and engineering of thermal spray coatings*, 2nd edn. Wiley
- Plasma Giken. 2015. <http://www.plasmagiken.com/products/coldspray.html>. Accessed 6 Jan 2014..
- Rokni, M. R., C. A. Widener, and V. R. Champagne. 2014. Microstructural evolution of 6061 aluminum gas-atomized powder and high-pressure cold-sprayed deposition. *Journal of Thermal Spray Technology* 23 (3): 514–524.
- Smith M.F., (1999), *Overview of Cold Spray*; Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, pp 1 – 20
- Villafuerte, J. 2010. Current and future applications of cold spray technology. *Metal Finishing* 108 (1): 37–39.
- VRC. 2014. <http://www.vrcmetalsystems.com/products.html>. Accessed 2 Aug 2014
- Wang, H.-T., C.-J. Li, G.-J. Yang, C.-X. Li, Q. Zhang, and W.-Y. Li. 2007. Microstructural characterization of cold-sprayed nanostructured FeAl intermetallic compound coating and its ball-milled feedstock powders. *Journal of Thermal Spray Technology* 16 (5/6): 669–676
- Xu Y. and Hutchings I.M., (2006), Cold spray deposition of thermoplastic powder; *Surface & Coatings Technology* 201, Elsevier B.V., pp 3044 – 3050
- Yule, A. J., and J. J. Dunkley. 1994. *Atomization of melts: for powder production and spray deposition*. New York: Oxford University Press

Zahiri S.H., Antonio C.I. and Jahedi M., (2009), Elimination of porosity in directly fabricated titanium via cold gas dynamic spraying; Journal of materials processing technology 209, Elsevier B.V., pp 922 - 929