



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*“Η Εξέλιξη της Σφαιριδιοβολής (Shot Peening) για την Αύξηση της Αντοχής  
Μεταλλικών Υλικών και οι Πιθανές Εφαρμογές στην Ελλάδα”*



**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ / ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ : ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΥΛΩΝΑΣ**

**ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ / ΕΚΠΟΝΗΤΡΙΑ : ΚΑΛΛΙΟΠΗ ΤΣΑΜΟΥΡΑ**

**Αθήνα, Μάρτιος 2021**



## ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ :

ΡΑΠΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ :

ΜΥΛΩΝΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ :

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Τσαμούρα Καλλιόπη του Στυλιανού, με αριθμό μητρώου 51204195 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανολόγων του Τμήματος Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



*Στην οικογένειά μου*

## Ευχαριστίες

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για τη βοήθεια που μου προσέφερε τον κ. Γεώργιο Μυλωνά ο οποίος διδάσκει στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και επιβλέπει την παρούσα διπλωματική εργασία. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω όλους του Καθηγητές του Τμήματος που παρείχαν τις κατάλληλες γνώσεις, δεξιότητες και μεταλαμπάδευσαν τον τρόπο σκέψης και πράξης στον τομέα των Μηχανολόγων Μηχανικών.

Τέλος, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς την οικογένειά μου, για τη συμπαράσταση, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει όλα αυτά τα χρόνια και να τους αφιερώσω το έργο μου αυτό.

**“ Η Εξέλιξη της Σφαιριδιοβολής (Shot Peening) για την Αύξηση της Αντοχής  
Μεταλλικών Υλικών και οι Πιθανές Εφαρμογές στην Ελλάδα”**

### **Περίληψη**

Η σφαιριδιοβολή είναι μια εν ψυχρώ κατεργασία, στην οποία η επιφάνεια ενός τμήματος βομβαρδίζεται με μικρά σφαιρικά σωματίδια, τα οποία δημιουργούν υψηλή πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια των μετάλλων. Η σφαιριδιοβολή χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών στις αυτοκινητοβιομηχανίες και στην αεροπορική βιομηχανία και εφαρμόζεται στα μεταλλικά τμήματα τα οποία απαιτούν μεγάλο επίπεδο επιφανειακής σκληρότητας και υψηλό επίπεδο αντοχής σε μηχανικές καταπονήσεις κατά τη χρήση τους. Οι παραμένουσες τάσεις που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης της βολής, υποστηρίζεται ότι οδηγεί σε επιβράδυνση ανάπτυξης ρωγμών από κόπωση, βελτιώνοντας την απόδοση των εξαρτημάτων. Ωστόσο, η κατεργασία αυτή είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ του πλεονεκτήματος της πρόκλησης παραμένουσας τάσης και της πρόκλησης επιφανειακής βλάβης. Η πρόθεση της διπλωματικής είναι να κατανοήσει τις βασικές αρχές της κατεργασίας αυτής, μέσω ανάλυσης της υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια, θα εξετασθεί η μέθοδος και τα αποτελέσματα της σφαιριδιοβολής και θα γίνει αναφορά σχετικά με το εύρος της χρήσης της στην Ελλάδα. Τέλος, θα επισημανθούν τα προτερήματα και τα αποτελέσματα της κατεργασίας, ώστε να εξακριβωθεί αν αξίζει να προταθεί ως τεχνική έναντι των μεθόδων που χρησιμοποιούνται ήδη στην Ελλάδα.

**Λέξεις-Κλειδιά:** σφαιριδιοβολή (shot peening), μεταλλικά υλικά, επιφανειακές κατεργασίες, ένταση σφαιριδιοβολής (intensity)

## Πίνακας περιεχομένων

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	IV
1. Εισαγωγή .....	- 1 -
1.1 Επιφανειακές κατεργασίες.....	- 1 -
1.2 Σφαιριδιοβολή .....	- 2 -
1.3 Οφέλη Σφαιριδιοβολής.....	- 3 -
1.4 Παραμένουσες Τάσεις (residual stresses).....	- 4 -
1.5 Κατεργασίες Παραγωγής και η Επίδραση της Κόπωσης.....	- 5 -
1.6 Επιμετάλλωση .....	- 8 -
1.6.1 Ανοδίωση.....	- 8 -
1.7 Heat Affected Zones (HAZ) .....	- 9 -
1.8 Εξανθράκωση .....	- 10 -
1.9 Φαινόμενο Σπηλαιώσης και Διάβρωσης .....	- 11 -
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	- 13 -
2.1 Πειραματικά δεδομένα .....	- 13 -
2.2 Περιγραφή Κατεργασίας .....	- 14 -
2.3 Παράμετροι της Σφαιριδιοβολής.....	- 18 -
2.4 Μέθοδοι Ελέγχου της Σφαιριδιοβολής.....	- 20 -
2.5 Κάλυψη Επιφάνειας.....	- 21 -
2.6 Τραχύτητα Επιφάνειας .....	- 22 -
2.7 Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων .....	- 23 -
2.8 Αποτελέσματα της ταχύτητας βολής και του μεγέθους βολής.....	- 25 -
2.9 Ανάπτυξη παραμένουσων τάσεων σε σχέση με τις ιδιότητες του υλικού... -	26 -
2.10 Τυπική σφαιριδιοβολή .....	- 27 -
3. Εφαρμογές Σφαιριδιοβολής στην Ελλάδα.....	- 29 -
3.1 Σφαιροβολή .....	- 30 -



3.2 Maycon .....	- 31 -
3.3 Oikonomou Design & Construction .....	- 34 -
3.4 Vernicol .....	- 34 -
3.5 ΣΤΕΛΜΑ Α.Τ.Ε. ....	- 35 -
3.6 Άμμος και Χρώμα Χαρίστας .....	- 36 -
3.7 Pytheas Group.....	- 36 -
3.8 Balcan Blast .....	- 37 -
4. Συμπεράσματα .....	- 39 -
Βιβλιογραφία .....	- 40 -

## Αρκτικόλεξο

<u>Ακρωνύμια</u>	<u>Ανάπτυξη</u>
HAZ	Heat Affected Zone
EDM	Electro-Discharge Machining
ECM	Electro-Chemical Machining
ELP	Electropolishing

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Επιφανειακές κατεργασίες

Η επιφάνεια ενός υλικού έχει τον πιο σημαντικό ρόλο στην απόκρισή του στις μηχανικές καταπονήσεις. Οι επιφάνειες υπόκεινται συχνά σε μια ποικιλία από κατεργασίες ώστε να αποκτήσουν συγκεκριμένες ιδιότητες οι οποίες δεν υπάρχουν εξ' αρχής βάσει των διαδικασιών πρωτογενούς παραγωγής [1]. Οι κατεργασίες λαμβάνουν χώρα για διάφορους λόγους, όπως είναι η βελτίωση των επιδόσεων των υλικών, η αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η διαμόρφωση της εμφάνισής τους και η αλλαγή των διαστάσεών τους [2]. Προκειμένου να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας, χρησιμοποιείται μια ευρεία γκάμα από θερμικές, μηχανικές και χημικές διαδικασίες. Αρκετές κατεργασίες επιφανειών χρησιμοποιούνται για πολλά υλικά από ημιαγωγούς μέχρι και μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή, βιοϋλικά και νανουλικά [3].

Η ποιότητα και οι μηχανικές ιδιότητες ενός προϊόντος σχετίζονται απ' ευθείας με την ακεραιότητα της επιφάνειας η οποία προέρχεται από τις κατεργασίες επεξεργασίας των επιφανειών. Η ακεραιότητα της επιφάνειας περιλαμβάνει την τοπογραφία (π.χ. διάβρωση, τραχύτητα), τις μηχανικές ιδιότητες (π.χ. παραμένουσες τάσεις και σκληρότητα), τις μεταλλουργικές ιδιότητες (π.χ. τη μετατροπή φάσης και την μικροδομή) και άλλες ιδιότητες των υλικών κατά τις διαδικασίες επεξεργασίας της επιφάνειας [2]. Επομένως, η αλλαγή των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων της επιφάνειας, ειδικά στις εφαρμογές που σχετίζονται με την μηχανική, έχει σημαντικές επιπτώσεις στην αντοχή του υλικού, στη διάρκεια ζωής και τις επιδόσεις του [2].

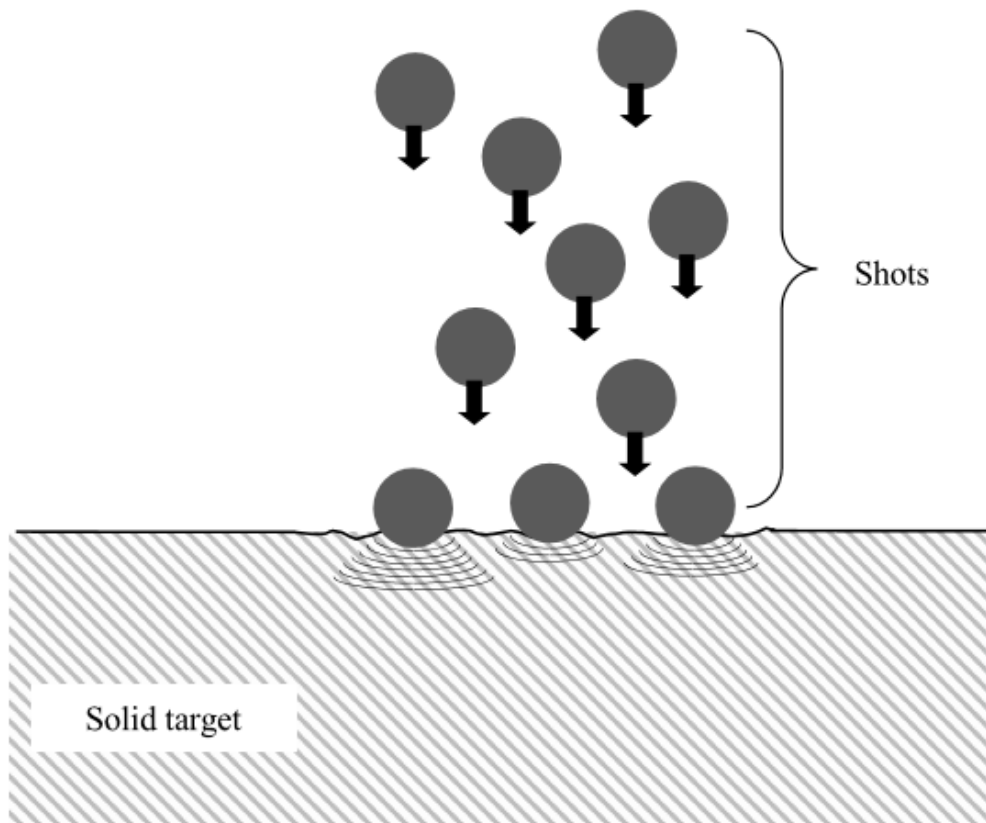
Υπάρχουν πολλές μηχανικές κατεργασίες οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν για να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των μηχανολογικών υλικών [4]. Οι κατεργασίες χρησιμοποιούν φυσικές διαδικασίες, ώστε να τροποποιήσουν και να καθορίσουν την τελική κατάσταση της επιφάνειας μετά από την επεξεργασία όπως για παράδειγμα τις θλιπτικές τάσεις. Οι θλιπτικές παραμένουσες τάσεις αναπτύσσονται στα όλκιμα μηχανικά μέταλλα μέσω εντοπισμένης πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή της εξωτερικής επιφάνειας [4]. Οι κατεργασίες που χρησιμοποιούνται με τη μεγαλύτερη συχνότητα στη σύγχρονη βιομηχανία μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: μεθόδους κοπής και μεθόδους μη κοπής [5]. Ωστόσο, ο κύριος σκοπός των μεθόδων κοπής είναι η παραγωγή της τελικής επιφάνειας του προϊόντος, ενώ οι επιφανειακές ιδιότητες των υλικών είναι μόνο δευτερεύοντες στόχοι.

Η παρούσα διπλωματική θα εστιάσει στην περιγραφή μιας μεθόδου μη κοπής, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για την βελτίωση του επιφανειακού στρώματος του υλικού. Η μέθοδος αυτή χωρίζεται σε επιπλέον δύο υποκατηγορίες, με βάση την κίνηση μεταξύ του εξοπλισμού και του υλικού, αλλά και με βάση τη φύση της δύναμης κρούσης, δηλαδή κρούση με ένα στατικό ή κινούμενο εργαλείο κρούσης [6].

## 1.2 Σφαιριδιοβολή

Η σφαιριδιοβολή ή «shot peening» είναι μια κατεργασία εν ψυχρώ, στην οποία η επιφάνεια ενός τμήματος βομβαρδίζεται με μικρά σφαιρικά σωματίδια που ονομάζονται «shots», τα οποία δημιουργούν υψηλή πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια των μετάλλων [7]. Η σφαιριδιοβολή χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία μεταλλικών επιφανειών στις αυτοκινητοβιομηχανίες, στην αεροπορική βιομηχανία και εφαρμόζεται στα μεταλλικά τμήματα τα οποία απαιτούν μεγάλο επίπεδο επιφανειακής σκληρότητας και υψηλό επίπεδο αντοχής σε μηχανικές καταπονήσεις κατά τη χρήση τους [8].

Κατά την κατεργασία, σφαιρίδια μικρών διαστάσεων, τα οποία κατασκευάζονται από σκληρά υλικά όπως το ατσάλι, κεραμικά υλικά ή γυαλί, χτυπούν την μεταλλική επιφάνεια με μεγάλη ταχύτητα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.1. Το μέγεθος των σφαιριδίων (0.3 mm ~ 1.3 mm κατά μέσο όρο) μπορεί να διαφέρει σε κάθε κατεργασία, καθώς επηρεάζει το μέγεθος της παραμένουσας καταπόνησης [9]. Η ταχύτητα που έχουν τα σφαιρίδια τη στιγμή της σύγκρουσης τους με την επιφάνεια (60 m/s κατά μέσο όρο) εξαρτάται επίσης από διάφορες μεταβλητές, όπως η γεωμετρία και το εύρος του ακροφυσίου, το μέγεθος των σφαιριδίων, η απόσταση από την στοχευμένη επιφάνεια κλπ. [10]. Μετά την πρόσκρουση, η περιοχή της οποίας η ελαστικότητα εξακολουθεί να υπάρχει έχει την τάση να ανακάμπτει, ωστόσο οι περιοχές που παραμορφώνονται διατηρούν ένα βαθμό μόνιμης παραμόρφωσης. Λόγω αυτών των ανομοιογενών ελαστικών – πλαστικών καταπονήσεων, δημιουργείται μια περιοχή παραμένουσας καταπόνησης [11].



**Εικόνα 1.1:** Σχηματική απεικόνιση της σφαιριδιοβολής [2]

Δεδομένου του ότι σχεδόν όλες οι αστοχίες έναντι της διάβρωσης υπό πίεση και τάση προέρχονται από την επιφάνεια ενός εξαρτήματος, οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται από το “shot peening” προσφέρουν σημαντική αύξηση στη διάρκεια ζωής του υλικού [7]. Οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται κοντά και κάτω από την επιφάνεια του υλικού είναι τουλάχιστον ίσες με το όριο διαρροής του υπό κατεργασία υλικού. Πολλά υλικά θα αυξήσουν επίσης την σκληρότητα της επιφάνειας λόγω της επίδρασης του shot peening ως ψυχρή κατεργασία.[4], [7], [12].

### 1.3 Οφέλη Σφαιριδιοβολής

Τα οφέλη που προσδίδονται στο υλικό από το shot peening είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης θλιπτικών τάσεων και της εν ψυχρώ κατεργασίας [13]. Οι θλιπτικές τάσεις προσδίδουν αύξηση της αντίστασης του υλικού έναντι της κόπωσης, της διάβρωσης, της τάσης για ρωγμές διάβρωσης, για ρωγμές με παρουσία υδρογόνου και την

διάβρωση που προκαλείται από σπηλαίωση [14]. Τα οφέλη που λαμβάνονται λόγω της ψυχρής κατεργασίας περιλαμβάνουν τη σκλήρυνση της επιφάνειας εργασίας, τη διακοκκική αντοχή στη διάβρωση, την βελτίωση της υφής της επιφάνειας, το κλείσιμο μιας πορώδους επιφάνειας και την προετοιμασία της επιφάνειας για τον δεσμό μεταξύ επιχρισμάτων προστασίας και χρωματισμών [13], [14]. Τόσο οι θλιπτικές τάσεις όσο και οι επιδράσεις της ψυχρής εργασίας αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή του shot peening σε μεταλλικά υλικά.

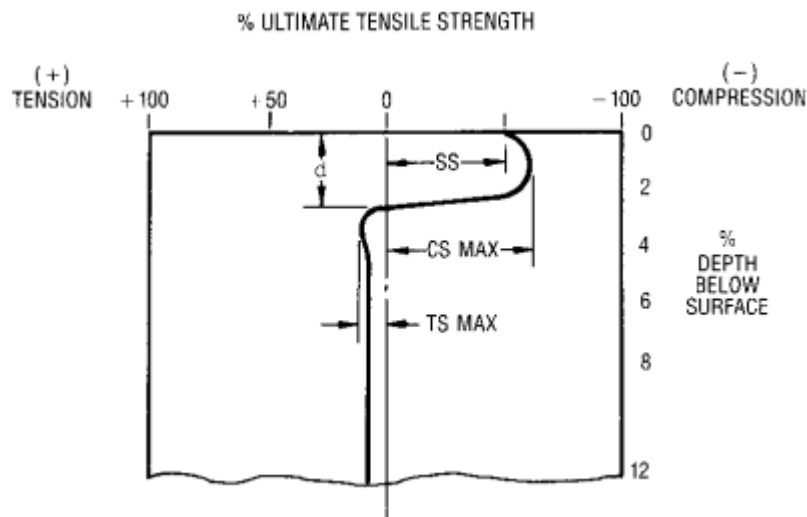
#### **1.4 Παραμένουσες Τάσεις (residual stresses)**

Παραμένουσες τάσεις είναι οι τάσεις που παραμένουν σε ένα μέρος του υλικού ύστερα από την ολοκλήρωση όλων των εργασιών της κατασκευής και χωρίς να εφαρμόζεται εξωτερικό φορτίο [15]. Αυτές οι παραμένουσες τάσεις μπορεί να είναι εφελκυστικές ή θλιπτικές. Για παράδειγμα, σε μια συγκολλημένη ένωση θα αναπτυχθούν παραμένουσες τάσεις εφελκυσμού μεγάλου μεγέθους στην ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα (HAZ) δίπλα στη συγκόλληση. Αντίθετα, η επιφάνεια στην οποία έγινε επαγωγή με σκληρά συστατικά μπορεί να περιέχει παραμένουσες θλιπτικές τάσεις [15]. Στις περισσότερες εφαρμογές με shot peening, το όφελος που λαμβάνεται είναι το άμεσο αποτέλεσμα των παραμενουσών τάσεων που αναπτύσσονται .

Στην εικόνα 1.2 παρακάτω, απεικονίζεται ένα τυπικό προφίλ παραμένουσας θλιπτικής τάσης, καθώς αλλάζει με το βάθος. Τα τέσσερα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής [16]:

1. SS – Επιφανειακές τάσεις , οι τάσεις που μετριόνται στην επιφάνεια.
2. C<sub>smax</sub> – Μέγιστη τιμή θλιπτικής παραμένουσας τάσης , η μέγιστη τιμή της συμπίεσης που προκαλείται, η οποία είναι συνήθως υψηλότερη ακριβώς κάτω από την επιφάνεια.
3. d - Βάθος, το βάθος της συμπιεστικής τάσης είναι το σημείο στο οποίο η συμπιεστική τάση διαπερνά τον ουδέτερο άξονα και δημιουργεί εφελκυσμό.

4.  $T_{smax}$  - Μέγιστη εφελκυστική τάση, η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής τάσης που προκαλείται. Η πίεση που αντισταθμίζει την εφελκυστική τάση στον πυρήνα του υλικού εξισορροπεί το επιφανειακό στρώμα της συμπίεσης έτσι ώστε το μέρος να παραμείνει σε ισορροπία. Το  $T_{smax}$  δεν πρέπει να αυξάνεται σε σημείο που να δημιουργήσει πρώιμες εσωτερικές αστοχίες.



**Εικόνα 1.2:** Παράδειγμα προφίλ παραμένουσας τάσης απο τη κατεργασία της σφαιριδιοβολής .[17]

Η μέγιστη τιμή του  $C_{smax}$  ονομάζεται συχνά η μέγιστη τάση στο οποίο υπόκειται το υλικό. Οι διακυμάνσεις στη διαδικασία του shot peening έχουν μικρή επίδραση στο μέγεθος της θλιπτικής τάσης που προκαλείται εφ 'όσον το σωματίδιο «shot» που χρησιμοποιείται είναι τουλάχιστον τόσο σκληρό όσο ή και πιο σκληρό από το υλικό. Το μέγεθος της θλιπτικής τάσης αποτελεί κατά κύριο λόγο συνάρτηση του ίδιου του υλικού και έχει τιμή τουλάχιστον το ήμισυ του ορίου διαρροής του υπό κατεργασία υλικού.

### 1.5 Κατεργασίες Παραγωγής και η Επίδραση της Κόπωσης

Η επιφανειακή σκλήρυνση που συνήθως αφήνει την επιφάνεια του υλικού ή του κατεργαζόμενου εξαρτήματος αποτελεί θετικό αποτέλεσμα της κατεργασίας. [16]. Η

κοπή, η στίλβωση και η σφυρηλάτηση είναι κατεργασίες βελτίωσης της επιφάνειας, κατά τις οποίες απομακρύνονται πολλά από τα ελαττώματα και οι ανεπιθύμητες αυξήσεις στις παραμένουσες τάσεις που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια άλλων κατασκευαστικών εργασιών [18]. Η έλαση θα αφήσει κοντά στην επιφάνεια παραμένουσες τάσεις (θλιπτικές ή εφελκυστικές), αλλά περιορίζονται σε κανονικές γεωμετρικές. Με το shot peening, όταν ελέγχεται σωστά, έχουν παρατηρηθεί καλύτερα αποτελέσματα στην αντοχή του υλικού.

Οι κατεργασίες παραγωγής είναι γνωστό ότι έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις ιδιότητες των μεταλλικών υλικών σε ότι αφορά την κόπωση. Τα αποτελέσματα είτε είναι αρνητικά για τις ιδιότητες κόπωσης ή θετικά. Στα αρνητικά περιλαμβάνονται η ολοκληρωτική σκλήρυνση, λείανση, σκληρή κατεργασία, επιμετάλλωση και συγκόλληση. Αυτές οι κατεργασίες τείνουν να προκαλούν παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις στο υλικό, μειώνοντας έτσι την διάρκεια ζωής του υλικού στη κόπωση.

Μη παραδοσιακές κατεργασίες είναι αυτές του ECM και του EDM, όπου συμβάλουν στην κόπωση. Στο EDM (Electro-Discharge Machining) παράγεται ένα στρώμα επιφάνειας που μπορεί να είναι εύθραυστο και ευαίσθητο στην εγκοπή υπό παραμένουσες τάσεις εφελκυσμού [19]. Οι αστοχίες λόγω κόπωσης μπορούν να προκύψουν στο αναδιαμορφωμένο στρώμα και διαδίδονται στο βασικό μέταλλο. Στο ECM (Electro-Chemical Machining), η χημική ουσία που χρησιμοποιείται μπορεί να προσβάλλει τα όρια των κόκκων αφήνοντάς τα σε κατάσταση που ευνοεί την ανάπτυξη ρωγμής [20].

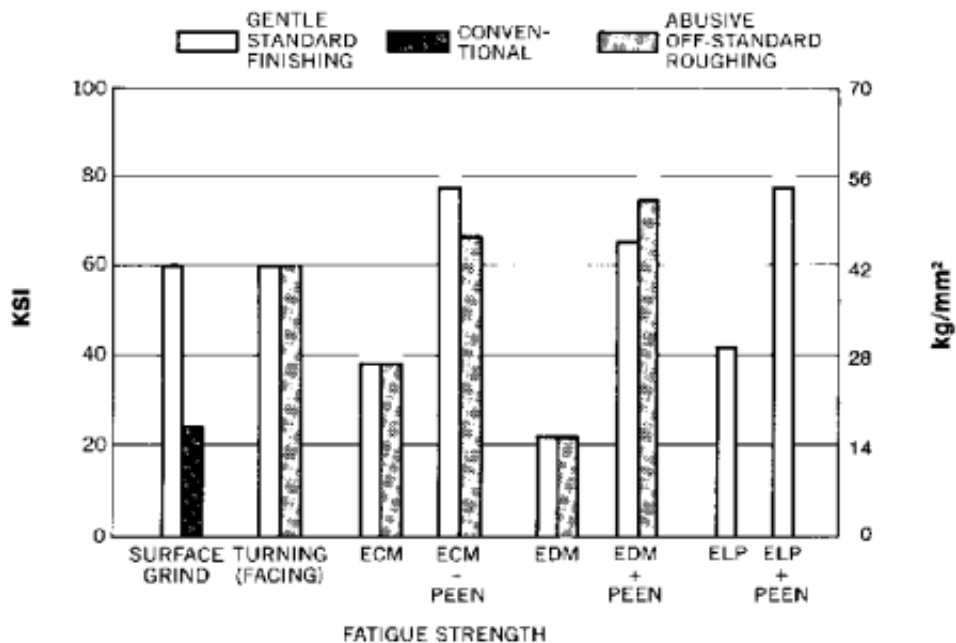
Οι παραμένουσες τάσεις εφελκυσμού και η ευθραυστότητα της επιφάνειας μπορεί να προκληθούν από τη δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια εργασιών λείανσης. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Outeiro (2018) και Elhameed (2018), παρατηρήθηκε πως τάσεις εφελκυσμού που δημιουργήθηκαν από τόρνο, μπορεί να προσεγγίσουν την μέγιστη τάση εφελκυσμού του ίδιου του υλικού [21], [22]. Οι παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις θα μειώσουν δραματικά την κόπωση ή την αντίσταση στη διάβρωση των εξαρτημάτων.

Η κατεργασία με σπινθήρα (spark erosion) δεν απαιτεί την εφαρμογή δύναμης, αυτό όμως δεν συνεπάγεται ότι τα διαβρωμένα μέρη δεν έχουν αναπτύξει παραμένουσες



τάσεις. Τα λιωμένα μέταλλα που παράγονται κατά την κατεργασία σπινθήρα δεν αποβάλλονται σωστά και όσα παραμένουν σταθεροποιούνται και σχηματίζουν μια σκληρή και εύθραυστη επιφάνεια. Οι θερμικές τάσεις, η πλαστική παραμόρφωση και η τοπική συρρίκνωση προκαλούν εφελκύστηκες παραμένουσες τάσεις που υπό ορισμένες συνθήκες, έχει βρεθεί να πλησιάζει την απόλυτη αντοχή εφελκυσμού του υλικού κοντά στην επιφάνεια [2].

Το shot peening είναι πολύ ωφέλιμο και για την ενίσχυση της αντοχής του υλικού σε φαινόμενα κόπωσης των μερών που έχουν υποστεί ηλεκτρομηχανική εκφόρτιση. Η επίδραση της σφυρηλάτησης στην ηλεκτροχημική ουσία εμφανίζεται σε επιφάνειες μηχανικής κατεργασίας, ηλεκτρο-εκφόρτισης και ηλεκτρο-στιλβωσης (ELP) [23].



**Εικόνα 1.3:** Βελτίωση συμπεριφοράς σε κόπωση για το υλικό Inconel 718, Solution-Treated and Aged (Rc44)

Η ηλεκτροχημική κατεργασία είναι η ελεγχόμενη διάλυση του υλικού όταν έρχεται σε επαφή με ένα ισχυρό χημικό αντιδραστήριο παρουσία ηλεκτρικού ρεύματος [24]. Ακόμα κι αν η ECM θεωρείται μια διαδικασία κατά την οποία δεν εφαρμόζονται υψηλές τάσεις, η μείωση του ορίου αντοχής προκαλείται από το μαλάκωμα της επιφάνειας που συχνά παρατηρείται (φαινόμενο επαναφοράς) και τις επιφανειακές

ατέλειες στα όρια των κόκκων [24]. Το shot peening και σε αυτή την περίπτωση μπορεί να αυξήσει το όριο αντοχής.

## **1.6 Επιμετάλλωση**

Αξίζει να αναφερθεί, πως είναι συνήθης τακτική σε πολλά εξαρτήματα να υπόκεινται σε shot peening, πριν από την κάλυψη με χρώμιο ή νικέλιο για την εξουδετέρωση των αρνητικών επιπτώσεων της κόπωσης στην διάρκεια ζωής τους [25]. Οι ρωγμές κοντά στην επιφάνεια εξαπλώνονται γρήγορα στο βασικό μέταλλο και οδηγούν σε πρόωρη αστοχία του υλικού απο κόπωση. Ωστόσο, όταν η επιφάνεια της μεταλλικής βάσης υποβάλλεται σε shot peening, οι ρωγμές δεν μπορούν να διαδοθούν στο βασικό μέταλλο. Μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση της αντίστασης απέναντι στην κόπωση που παρατηρείται σε μέταλλο όπως το ατσάλι 4340, λόγω του shot peening πριν από τη διαδικασία κάλυψης [26].

Ενδεικτικό είναι, πως οι προδιαγραφές QQ-C-320 και MIL-C-26074A απαιτούν “shot peening” σε ατσάλινα εξαρτήματα που θα καλυφθούν με χρώμιο ή επινικελωμένο ηλεκτρολύτη, καθώς απαιτούν απεριόριστη ζωή υπό δυναμικά φορτία [27]. Άλλες διεργασίες κάλυψης όπως το κάδμιο μπορούν επίσης να μειώσουν την αντοχή στην κόπωση, εκτός κι αν προηγηθούν του shot peening.

### **1.6.1 Ανοδίωση**

Η ανοδίωση είναι μια άλλη εφαρμογή στην οποία το “shot peening” βελτιώνει την αντοχή στην κόπωση των επικαλυμμένων υλικών [28]. Οι επικαλύψεις ψευκασμού πλάσματος τείνουν επίσης να μειώσουν την αντίσταση στην κόπωση [29]. Όπως και με τις ανωτέρω επιφανειακές κατεργασίες, όταν προηγηθεί shot peening μπορεί να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά του υλικού σε κόπωση.

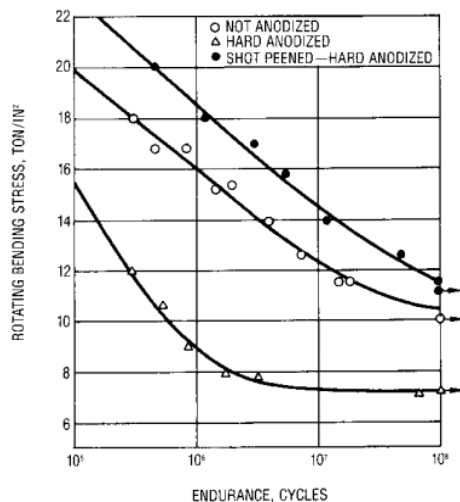


Fig. 14 R.R.Moore Fatigue Strength of Titanium 6AL-4V Polished vs. AS - Sprayed Coating with Pre-spray Conditioning Grit Blast and/or Shot-Peen - METCO 64F

## 1.7 Heat Affected Zones (HAZ)

Η θερμότητα που παράγεται από τη διαδικασία συγκόλλησης συχνά προκαλεί εφελκυστικές τάσεις. Αυτές οι επιβλαβείς καταπονήσεις στη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα (HAZ) συμβάλλουν στα χαρακτηριστικά αρνητικής κόπωσης των συγκολλήσεων [30]. Η βελτίωση της αντοχής στην κόπωση μπορεί να επιτευχθεί με δύο βασικά βήματα [30]:

1. Βελτίωση της γεωμετρίας συγκόλλησης λειαίνοντας το προφίλ ρυμούλκησης συγκόλλησης, καθώς οι ρωγμές ξεκινούν από γεωμετρικές ασυνέχειες.
2. Πρόκληση επιφανειακών εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις όπου προτιμάται η μέθοδος “shot peening” για την παροχή σημαντικής αύξησης αντίστασης σε κόπωση.

Οι ρωγμές κόπωσης ξεκινούν στο βασικό μέταλλο, στο υλικό συγκόλλησης ή στη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα (HAZ). Εφόσον εντοπιστεί μια τέτοια ρωγμή, το προτεινόμενο σχήμα επισκευής είναι [30]:

1. Μείωση της συγκέντρωσης τάσης, αποφεύγοντας τις αδέσποτες κινήσεις τόξου, λειαίνοντας τις ρωγμές συγκόλλησης και ντύνοντας το γέμισμα.

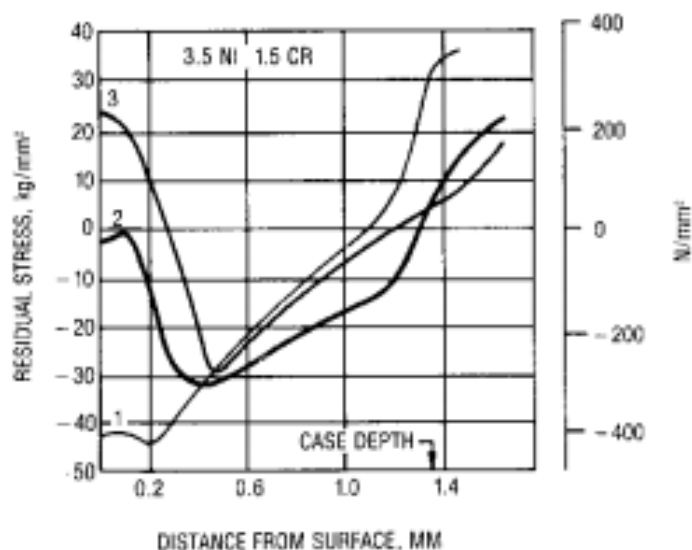
2. Αντικατάσταση του μετάλλου συγκόλλησης.
3. Εφαρμογή “shot peening” για να προκληθούν θλιπτικές τάσεις.

Σύμφωνα με την έρευνα του Champaigne (2001), η χρήση της σφαιριδιοβολής στην επιδιόρθωση, μετά την συγκόλληση δηλώνει ότι χρησιμοποιούνται υψηλότερες τάσεις για την πρόκληση θλιπτικών τάσεων, για την ενίσχυση της αντίστασης σε κόπωση [17]. Συγκεκριμένα η έρευνα έδειξε πως ο αριθμός των ωρών λειτουργίας μετά την επισκευή συγκόλλησης ήταν [17]:

- Χωρίς Shot Peening → 7561 Ώρες (αναπτύχθηκαν ρωγμές κόπωσης)
- Με Shot Peening → 35.629 Ώρες (χωρίς ρωγμές κόπωσης )

### **1.8 Εξανθράκωση**

Η εξανθράκωση ορίζεται ως η απώλεια άνθρακα από την επιφάνεια ενός σιδηρούχου κράματος, ως αποτέλεσμα της θέρμανσης σε ένα μέσο που αντιδρά με τον άνθρακα στην επιφάνεια του [17]. Έχει αποδειχθεί, πως η εξανθράκωση μπορεί να προκαλέσει μείωση της αντοχής κόπωσης των ατσαλιών υψηλής αντοχής (240KSI και άνω) κατά 70% σε 80% και των ατσαλιών χαμηλότερης αντοχής αντίστοιχα (140KSI έως 150 KSI) κατά 45% έως 55% [17]. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στην εικόνα 1.3.



**Εικόνα 1.4:** Επίδραση του Shot Peening στην εξανθράκωση .[17]

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η εξανθράκωση είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο που δεν σχετίζεται ιδιαίτερα με το βάθος. Ένα βάθος για παράδειγμα 0,003 ιντσών μπορεί να είναι τόσο επιζήμιο για την εξέλιξη της αντοχής σε κόπωση. Ωστόσο, η ποσότητα της εξανθράκωσης μπορεί να έχει δραματική επίδραση στις ιδιότητες κόπωσης του ατσαλιού [17].

Το “shot peening” έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό στην αποκατάσταση των περισσότερων, αν όχι όλων, χαρακτηριστικών της αντοχής κόπωσης που χάθηκε λόγω εξανθράκωσης. Επειδή το εξανθρακωμένο στρώμα, αν και μαλακότερο, δεν ανιχνεύεται εύκολα σε ποσότητες ανταλλακτικών, το “shot peening” μπορεί να διασφαλίσει την ακεραιότητα των εξαρτημάτων σε μεγάλο βαθμό και εφαρμόζεται όταν υπάρχει υποψία εξανθράκωσης [17].

## 1.9 Φαινόμενο Σπηλαίωσης και Διάβρωσης

Οι βλάβες λόγω σπηλαίωσης, είναι αποτέλεσμα υψηλής σχετικής κίνησης μεταξύ ενός μετάλλου και ενός υγρού. Εάν η πίεση που συνοδεύει μια κίνηση υψηλής ταχύτητας πέφτει σε πίεση ατμών, το υγρό θα εξατμιστεί και θα σχηματίσει μια κοιλότητα ατμού στην μεταλλική επιφάνεια [31]. Σε μια ελαφρά αύξηση της πίεσης, αυτή η φούσκα θα καταρρεύσει, προκαλώντας μια συμπυκνωμένη κρούση υγρού με αποτέλεσμα την

διάβρωση και την διάτρηση της μεταλλικής επιφάνειας. Μόλις ξεκινήσει, η βλάβη σπηλαιώσης είναι προοδευτική και αθροιστική [31]. Το “shot peening” έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικό στην επιβράδυνση της βλάβης σπηλαιώσης σε χάλυβα 1020 και ορείχαλκο 70C [17]. Το όφελος από αυτήν την κατεργασία φαίνεται να σχετίζεται με τη σκλήρυνση. Όσο περισσότερη δουλειά γίνεται στο υλικό, τόσο μεγαλύτερο είναι το όφελος. Η επιφανειακή τοπική σκλήρυνση καθιστά το υλικό πιο δυνατό και πιο ανθεκτικό στις ζημιές που προκαλούνται από την κατάρρευση των φυσαλίδων [17].

Η διάβρωση μπορεί να αναπτυχθεί όταν η σχετική κίνηση μικροσκοπικού πλάτους συμβαίνει ανάμεσα σε δύο μεταλλικές επιφάνειες [32]. Καθώς τρίβονται οι επιφάνειες, σχηματίζονται λεπτά λειαντικά οξείδια, τα οποία συμβάλλουν στη χάραξη των επιφανειών. Η διάβρωση προκαλεί μία ή περισσότερες μορφές φθοράς, όπως ρωγμές και σημάδια κόπωσης. Η φθορά από τη διάβρωση και η διάβρωση από φθορά, αντίστοιχα, συμβαίνουν ως άμεσο αποτέλεσμα καταπόνησης του υλικού [32]. Ο επιφανειακός αποχρωματισμός, η συσσώρευση στρώματος οξειδίου και η μείωση αντοχής απέναντι στην κόπωση των μερών [32] είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας. Το “Shot peening” έχει αποδειχθεί επιτυχές στην επιβράδυνση της ταλαιπωρίας των μεταλλικών επιφανειών και τελικά την διάβρωση, αυξάνοντας τη σκλήρυνση της επιφάνειας μέσω της κατεργασίας του μετάλλου εν ψυχρώ και αναπτύσσοντας θλίπτικές παραμένουσες τάσεις, η οποία «τεντώνει» τις επιφάνειες που έχουν διαβρωθεί [17]. Οι κρατήρες που αναπτύσσονται στην επιφάνεια μέσω του “shot peening” ενεργούν ως δεξαμενές λαδιού, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη κατακράτηση λιπαντικού [17].

## 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η αναζήτηση αξιόπιστων και χρήσιμων πηγών, έλαβε μέρος σε βάσεις δεδομένων διεθνούς βιβλιογραφίας (Scopus, Google Scholar, IEEE και Science Direct) με λέξεις κλειδιά: shot peening process, metals, surface treatments, peening intensity, καθώς και με συνδυασμούς των παραπάνω λέξεων. Τα κριτήρια επιλογής των δημοσιεύσεων που προέκυψαν από τις αναζητήσεις ήταν η χρονολογία (να έχουν δημοσιευτεί την τελευταία δεκαετία), η γλώσσα συγγραφής (Αγγλικά) και η συνάφεια ως προς το θέμα της διπλωματικής. Από τα άρθρα τα οποία προέκυψαν, ακολούθησε η ανάλυσή τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων τα οποία καταγράφονται στις παρακάτω παραγράφους. Πολλές είναι οι πειραματικές μελέτες οι οποίες αναλύουν την επίδραση της σφαιριδιοβολής στη δημιουργία μιας περιοχής τάσης και της επίδρασης της τάσεως αυτής στην αντοχή του υλικού σε καταπόνηση.

### 2.1 Πειραματικά δεδομένα

Οι Lee et al. (2011) [33], ανέλυσαν την επίδραση του πεντακένιου (pentacene) στην επιφανειακή σκλήρυνση του ανθρακούχου χάλυβα με τη διαδικασία σφαιριδιοβολής με τη χρήση τριών διαφορετικών περιεκτικότητων σε άνθρακα (0,1%, 0,45% και 0,8%). Τα δείγματα επεξεργάστηκαν με σφαιριδιοβολή διαφορετικής διάρκειας χρησιμοποιώντας ατσάλινες σφαίρες από στρογγυλεμένο σύρμα κοπής με μέση διάμετρο 250  $\mu\text{m}$ . Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σκληρότητα της επιφάνειας αυξάνεται με τη αύξηση της περιεκτικότητας του ατσαλιού σε άνθρακα. Η ίδια έρευνα συμπεραίνει ότι η σκλήρυνση της επιφάνειας επιτυγχάνεται μέσω των κόκκων αλλά και της διάσπασης του άνθρακα μετά την αλλαγή της φάσης της σεμεντίνης. Παρατηρήθηκε ένα υψηλότερο ποσοστό βελτίωσης μέσω των σφαιριδίων και μεγαλύτερο ποσό διαλυμένης σεμεντίνης στο φερρίτη, στα υλικά ατσαλιού με υψηλότερο περιεχόμενο σε άνθρακα. Αυτό καθιστά το φερρίτη υπερκορεσμένο με τον άνθρακα, και προκαλεί αύξηση του βαθμού σκληρότητας της επιφάνειας [33].

Οι Sanjuro et al. (2014) [34], μελέτησαν τα αποτελέσματα της σφαιριδιοβολής σε ανοξείδωτο ατσάλι, τύπου AISI 2250. Κατεργάστηκαν το υλικό με σφαιριδιοβολή σε ελεγχόμενες συνθήκες. Χρησιμοποιήθηκαν σφαιρίδια από χυτό χάλυβα τύπου S-230 και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με το ίδιο υλικό μετά από επεξεργασία σφαιριδιοβολής μικρότερης έντασης. Όπως αναμένονταν, η επεξεργασία με ελεγχόμενη σφαιριδιοβολή ήταν πολύ περισσότερο αποτελεσματική και απέδιδε

παραμένουσα τάση 631 MPa σε σχέση με την τάση 367 MPa στην περίπτωση της επεξεργασίας με μικρότερη ένταση. Επιπλέον, το συνολικό πάχος της στρώσης συμπίεσης που δημιουργήθηκε από την πειραματική διαδικασία ήταν κατά 350 μm βαθύτερο σε σχέση με αυτό που δημιουργήθηκε από την βιομηχανική κατεργασία [34].

Τα αποτελέσματα της μονής και διπλής σφαιριδιοβολής στην σκληρότητα, στην αντοχή και στην τραχύτητα της επιφάνειας του οστενικού χάλυβα, μελετήθηκαν από τους Singh et al. (2010) [35]. Αρχικά, και τα δύο δείγματα επεξεργάστηκαν με σφαιριδιοβολή στην οποία χρησιμοποιήθηκαν γυάλινες σφαίρες, ωστόσο στη διπλή σφαιριδιοβολή χρησιμοποιήθηκαν μικρό-σφαίρες από ζirkόνιο. Η μελέτη βρήκε ότι η διπλή σφαιριδιοβολή μειώνει την τραχύτητα της επιφάνειας χωρίς σημαντικές αλλαγές στην παραμένουσα τάση. Σαν αποτέλεσμα, αυξάνεται η διάρκεια ζωής του υλικού κυρίως λόγω βελτιώσεων στην επιφάνεια του υλικού από την επεξεργασία [35].

Επιπλέον, ο Laamuri et al. (2013) [36], εκτίμησαν τη διάρκεια ζωής του ατσαλιού AISI 4340, το οποίο χρησιμοποιείται για τα συστήματα προσγείωσης των αεροσκαφών, μέσα από τέσσερις σφαιριδιοβολές διαφορετικής έντασης (τέσσερις κατεργασίες με διαφορετικές πιέσεις από 8 μέχρι και 45 psi). Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν σφαιρίδια με μέση διάμετρο 0,7 mm. Βρέθηκε ότι στο υψηλότερο σημείο καταπόνησης, δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στους κύκλους μέχρι την αστοχία του υλικού, εκτός από την περίπτωση της κατεργασίας με ελάχιστη πίεση (8psi). Ωστόσο, υπάρχει μια αύξηση στην διάρκεια ζωής του υλικού για τους μεσαίους και υψηλούς κύκλους. Έχει επίσης σημειωθεί, ότι οι μέσες εντάσεις στην σφαιριδιοβολή προκαλούν την βέλτιστη αύξηση αντοχής. Η επιφάνεια υπόκειται σε κάποιες αστοχίες στην μορφή μικρών σχισμών, οι οποίες ωστόσο μπορεί να αποτελέσουν το έναυσμα για ρωγμές κατά τις δοκιμές καταπόνησης [36].

## **2.2 Περιγραφή Κατεργασίας**

Όπως προαναφέρθηκε η σφαιριδιοβολή είναι μια κατεργασία η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση της αντοχής των μετάλλων στην αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά και στην παραγωγή λεπτών τμημάτων με πολύπλοκα σχήματα όπως επιφάνειες



φτερών αεροπλάνων στην αεροναυπηγική. Οι σημαντικότερες παράμετροι της κατεργασίας οι οποίοι επηρεάζουν τα αποτελέσματά της είναι:

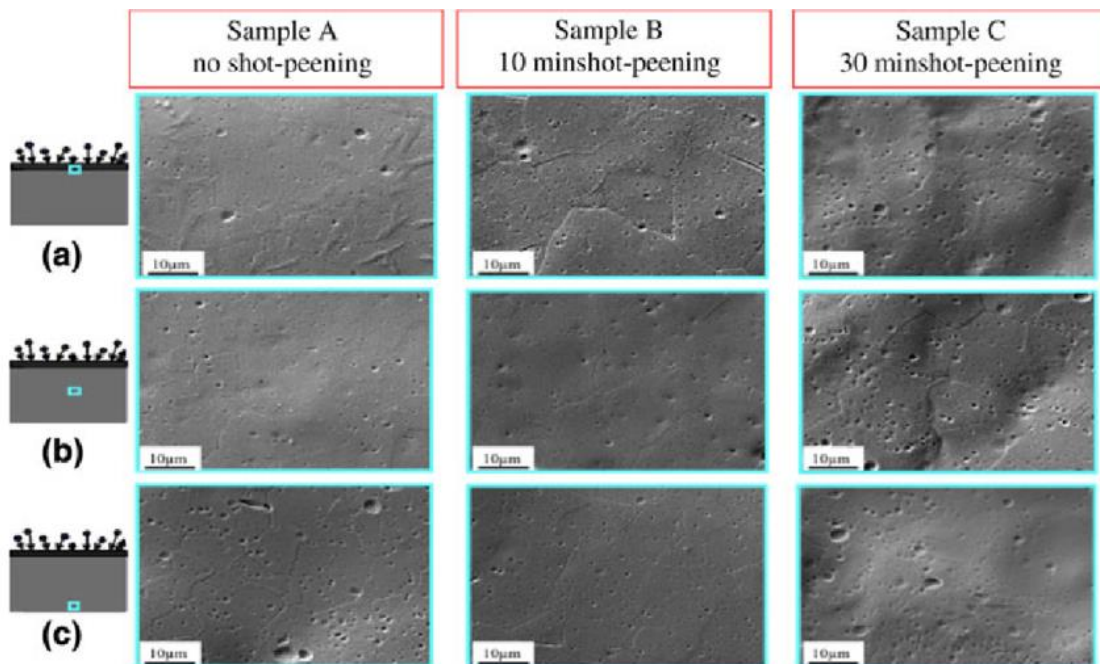
- 1) το μέγεθος των σφαιριδίων,
- 2) η πίεση (άμεση σχέση με την ταχύτητα κρούσης),
- 3) η γωνία πρόσπτωσης και
- 4) οι μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου επεξεργασίας - στόχου.

Στην βιομηχανία δύο είναι οι παράμετροι οι οποίες χαρακτηρίζουν την ένταση και την επαναληψιμότητα της διαδικασίας: η ένταση της σφαιριδιοβολής και η επιφάνεια κάλυψής της. Η ένταση της σφαιριδιοβολής σχετίζεται με την ποσότητα της κινητικής ενέργειας (ανάλογη με τη μάζα και την ταχύτητα των σφαιριδίων) η οποία μεταφέρεται από την ροή των σφαιριδίων στο μέταλλο που επεξεργάζεται. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως για την ποσοτικοποίηση της έντασης της διεργασίας ονομάζεται ένταση Almen [37]. Στη μέθοδο αυτή, η επιφάνεια η οποία καλύπτεται ορίζεται σαν ο λόγος της επιφάνειας η οποία δέχεται σφαιριδιοβολή ως προς τη συνολική επιφάνεια που επεξεργάζεται, και εκφράζεται σαν ποσοστό. Μελετώντας το συγκεκριμένο δείκτη λεπτομερώς, μπορούμε να λάβουμε πολλές πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας βασιζόμενοι σε αναλυτικές, αριθμητικές και πειραματικές μεθόδους [37].

Κατά την σφαιριδιοβολή, η πρόσπτωση σφαιριδίων με μεγάλη ταχύτητα δεν έχει μόνο σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία παραμένουσας τάσης στις μεταλλικές επιφάνειες, αλλά και την αύξηση της τραχύτητας. Η μεγαλύτερη τραχύτητα μιας επιφάνειας σημαίνει ότι θα έχει περισσότερα ακανόνιστα τμήματα στο σύνολό της τα οποία δρουν ως συγκεντρωτές τάσης και αυξάνουν την διάρκεια ζωής του υλικού. Επομένως, η απόδοση της σφαιριδιοβολής είναι μια αναλογία ανάμεσα στα οφέλη της διαδικασίας (θλιπτική παραμένουσα τάση) και τις δυσμενείς επιπτώσεις της στο υλικό (τραχύτητα) [37].

Κάθε σφαιρίδιο το οποίο προσκρούει στην επιφάνεια επεξεργασίας δρα σαν ένα μικρό σφυρί, προσδίδοντας στην επιφάνεια ένα αυλάκι που περικλείεται από μια ζώνη πλαστικότητας. Όταν η επαφή μεταξύ του στόχου και της βολής σταματήσει, οι περιοχές οι οποίες έχουν καταπονηθεί ελαστικά τείνουν να ανακάμπτουν, ενώ οι περιοχές οι οποίες έχουν παραμορφωθεί πλαστικά διατηρούν σε κάποιο βαθμό την

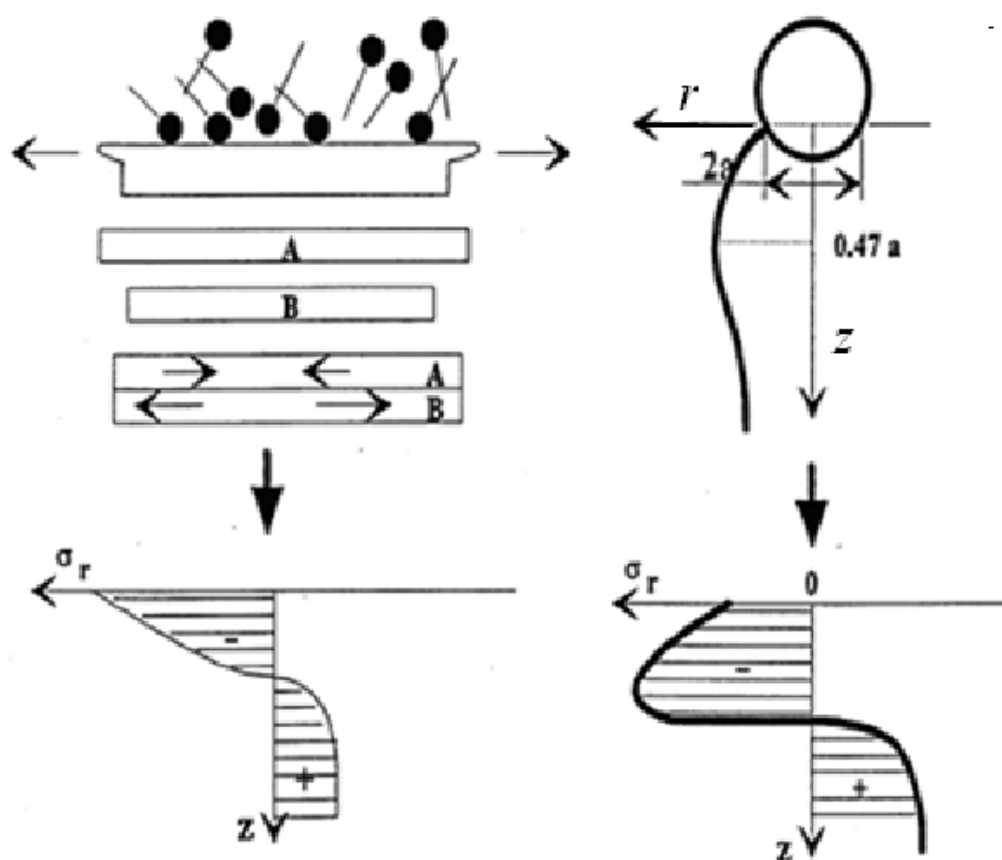
παραμόρφωσή τους μόνιμα. Αυτές οι ανομοιογενείς ελαστικές-πλαστικές παραμορφώσεις έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας περιοχής παραμένουσας τάσης στην εκτεθειμένη ανώτερη επιφάνεια του υλικού. Το συγκεκριμένο στρώμα παραμένουσας τάσης μειώνει την πιθανότητα πρόωρης καταστροφής του υλικού κάτω από συνθήκες εναλλαγής φόρτωσης [38], [39].



**Εικόνα 2.1:** Εικόνες δειγμάτων από SEM, έπειτα από κατεργασία σφαιριδιοβολής, (a) από την επιφάνεια του υλικού (b) στο κέντρο και (c) κάτω από την ανεπηρέαστη επιφάνεια .[40]

Ο Webster περιέγραψε δύο διαδικασίες δημιουργίας παραμένουσας τάσης, όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 2.2 [39]. Η μία είναι η απ' ευθείας πλαστική επιμήκυνση της ανώτερης στριβάδας λόγω των πολυάριθμων αποτυπωμάτων που αφήνει η σφαιριδιοβολή (αριστερό τμήμα της Εικόνας 2.2). Μετά τη σφαιριδιοβολή το επίπεδο  $rz$  της επιφάνειας στόχου διαιρείται σε δύο διαφορετικά τμήματα. Το Τμήμα Α αντιπροσωπεύει την πλαστική παραμόρφωση μέσω της σφαιριδιοβολής, ενώ το τμήμα Β αντιπροσωπεύει την περιοχή κάτω από την πλαστική παραμόρφωση. Η ελαστική-πλαστική παραμόρφωση της παραμένουσας τάσης με το μέγιστο μέγεθος είναι συνήθως η μοναδική παραμόρφωση ή η πιο επικρατής. Η δεύτερη τάση η οποία

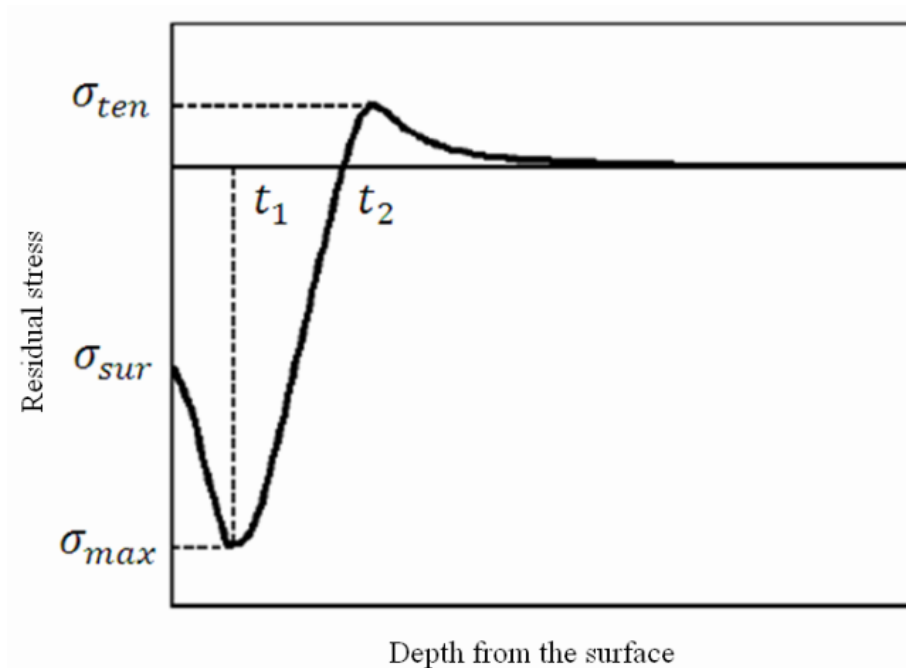
παράγεται από τη διεργασία, μπορεί να εξηγηθεί μέσω της πίεσης Hertz, και παράγει πλαστική παραμόρφωση της επιφάνειας, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα της Εικόνας 2. Η παραμένουσα τάση έχει μέγιστη τιμή στην απόσταση  $z = 0,47 a$  κάτω από την επιφάνεια, όπου  $a$  είναι η ακτίνα του πλαστικού αποτυπώματος. Στην πράξη, η κατανομή παραμένουσας τάσης μετά την σφαιριδιοβολή δίνει ένα συνδυασμό των δύο αυτών αποτελεσμάτων, την απ' ευθείας πλαστικής παραμόρφωσης και τη πλαστικής παραμόρφωσης των πιο βαθύτερων στρωμάτων του υλικού λόγω πίεσης Hertz [39].



**Εικόνα 2.2:** Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας παραμένουσων τάσεων ως αποτέλεσμα δύο ανταγωνιστικών κατεργασιών: της απ' ευθείας επιμήκυνσης της επιφάνειας (αριστερά) και της πίεσης Hertz [41]

Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται ένα τυπικό πεδίο παραμένουσας τάσης το οποίο περιγράφεται από 5 συντελεστές [39]:

- $\sigma_{max}$  = η μέγιστη παραμένουσα τάση
- $\sigma_{sur}$  = η παραμένουσα τάση της επιφάνειας
- $\sigma_{ten}$  = η μέγιστη παραμένουσα τάση εφελκυσμού
- $t_1$  = το βάθος της μέγιστης συμπιεστικής παραμένουσας τάσης
- $t_2$  = το βάθος στο οποίο η τάση αλλάζει πρόσημο (μετατρέπεται από συμπιεστική τάση σε τάση εφελκυσμού).



**Εικόνα 2.3:** Σχηματική απεικόνιση της παραμένουσας τάσης που προκαλείται από την σφαιριδιοβολή [39]

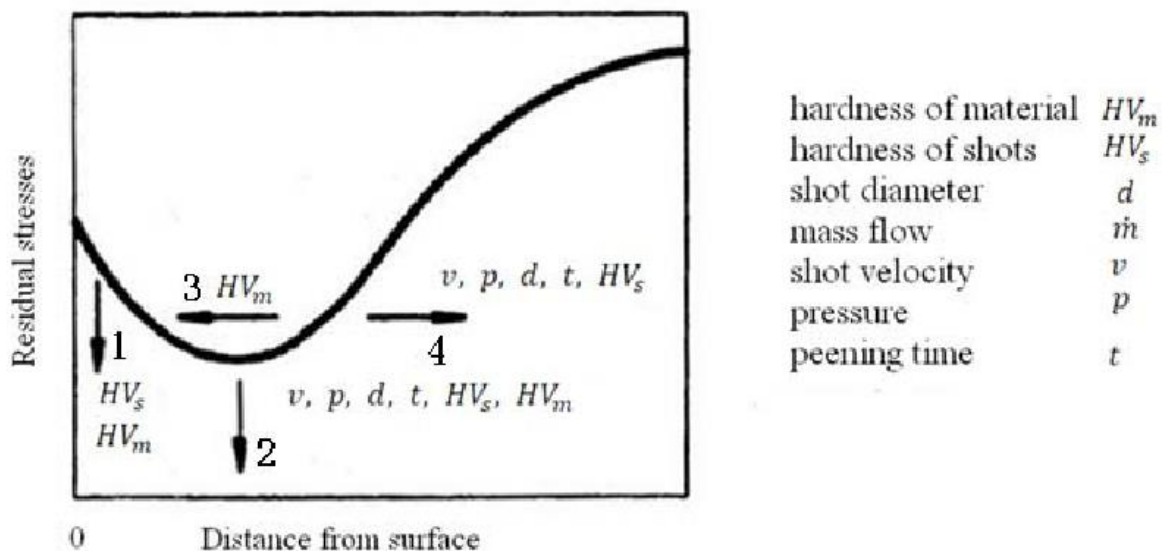
### 2.3 Παράμετροι της Σφαιριδιοβολής

Πολλοί είναι οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της σφαιριδιοβολής. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές ομάδες [42]:

- Παράμετροι βολής: τύπος, μέγεθος, πυκνότητα, σκληρότητα, αντοχή στην απόδοση, σκληρότητα.
- Παράμετροι επιφάνειας στόχου: σκληρότητα, ακαμψία, χημική σύσταση, κατάσταση της επιφάνειας πριν την επεξεργασία, κλπ.

- Παράμετροι ροής: ρυθμός ροής της μάζας, πίεση, ταχύτητα, γωνία πρόσκρουσης.

Δουλεύοντας πάνω στα βασικά στοιχεία της τεχνικής της σφαιριδιοβολής, οι Herzog et al., ανέλυσαν τα αποτελέσματα που είχαν οι διαφορετικές παράμετροι της τεχνικής στην πρόκληση παραμένουσας τάσης στις επιφάνειες. Στη μελέτη τους, η επιρροή της σκληρότητας του υλικού στόχου  $HV_m$ , η σκληρότητα της βολής  $HV_s$ , η διάμετρος  $d$  των σφαιριδίων, η ταχύτητα  $v$  των σφαιριδίων, η ροή μάζας  $m$ , η πίεση  $p$  και ο χρόνος της σφαιριδιοβολής  $t$  είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την τεχνική και απεικονίζονται στην Εικόνα 2.4 [43]. Στην εικόνα αυτή, οι κατευθύνσεις των βέλων δείχνουν την επιρροή που έχουν οι παραπάνω παράμετροι στο προφίλ της παραμένουσας τάσης. Το βέλος 1 δείχνει ότι η τιμή της επιφανειακής τάσης  $\sigma_{sur}$  αυξάνει ανάλογα με την αύξηση των  $HV_s$  και  $HV_m$ . Το βέλος 2 δείχνει ότι η τιμή της μέγιστης τάσης αυξάνει ανάλογα με την αύξηση των  $v$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $t$ ,  $HV_s$  και  $HV_m$ . Το βέλος 3 δείχνει ότι το βάθος της μέγιστης τάσης αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με το  $HV_m$  και το βέλος 4 δείχνει ότι το  $t_1$  αυξάνει ανάλογα με τα  $v$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $t$  και  $HV_s$  [43].



**Εικόνα 2.4:** Τα αποτελέσματα που έχουν οι παράμετροι της σφαιριδιοβολής πάνω στο προφίλ της παραμένουσας τάσης [43]

## 2.4 Μέθοδοι Ελέγχου της Σφαιριδιοβολής

Η μέτρηση της έντασης Almen και της επιφάνειας κάλυψης είναι οι δύο κύριες μέθοδοι ελέγχου της σφαιριδιοβολής οι οποίες διασφαλίζουν την επαναληψιμότητα και την ακρίβεια κατά την εφαρμογή της μεθόδου στη βιομηχανία. Το 1940, ο Almen, ανέπτυξε πρώτος μια συγκεκριμένη διαδικασία για τη μέτρηση της κινητικής ενέργειας η οποία μεταφέρεται από τη ροή των σφαιριδίων. Οι προδιαγραφές των μηχανημάτων σφαιριδιοβολής αναφέρονται στην ενέργεια αυτή με τον όρο ένταση κατά τον κορεσμό. Η μέτρηση της έντασης της σφαιριδιοβολής γίνεται με την μέτρηση των αποτελεσμάτων της κατεργασίας πάνω σε συγκεκριμένα τμήματα μετάλλου που χρησιμοποιούνται σαν πρότυπα δοκιμών και ονομάζονται ταινίες Almen. Η μέτρηση γίνεται με ένα τυποποιημένο εργαλείο το οποίο ονομάζεται μετρητής Almen [37].

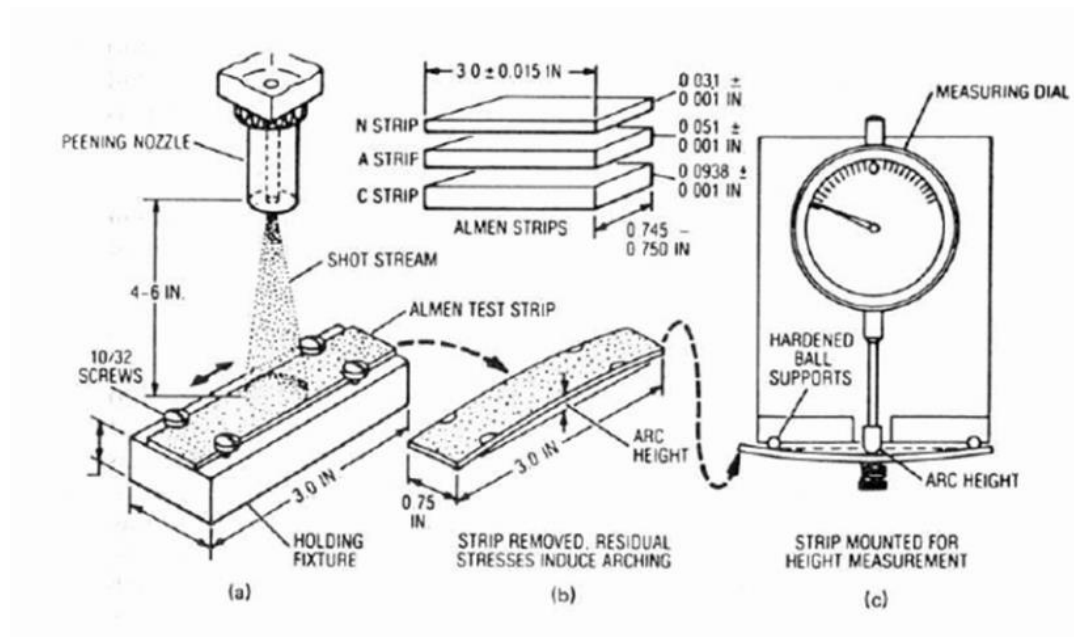
Η Εικόνα 2.5 δείχνει ένα τυπικό σύστημα μέτρησης έντασης Almen, το οποίο αποτελείται από τρία στοιχεία:

- τρεις ταινίες Almen διαφορετικών παχών από ατσάλι SAE1070 (Πίνακας 2.1)
- ένα ατσάλινο τμήμα στερέωσης στο οποίο προσαρμόζονται και στηρίζονται οι ταινίες κατά τη σφαιριδιοβολή και
- έναν μετρητή που υπολογίζει το ύψος του τόξου των ταινιών Almen.

Όταν μια λεπτή μεταλλική ταινία, υποβάλλεται σε σφαιριδιοβολή σε μια από τις δύο πλευρές της, λυγίζει (κύρτωμα προς την επιφάνεια που δέχεται τη βολή) λόγω πλαστικών παραμορφώσεων. Η ένταση Almen είναι μια μέτρηση του ύψους της καμπύλης (ίντσες ή χιλιοστά) στο κέντρο των ταινιών Almen λόγω της σφαιριδιοβολής. Μια υψηλότερη ένταση (μεγαλύτερη καμπύλη) σημαίνει μεγαλύτερη ποσότητα κινητικής ενέργειας η οποία μεταφέρεται στα τμήματα του μετάλλου που δέχονται επεξεργασία [44]

**Πίνακας 2.1:** Διαστάσεις ταινιών Almen [44]

Strip	Thickness(in)	Length (in)	Width (in)	Use for
N	0.031+/-0.001	3 +/- 0.015	0.745 – 0.750	Low Intensity
A	0.051+/-0.001	3 +/- 0.015	0.745 – 0.750	Average Intensity
C	0.938+/-0.001	3 +/- 0.015	0.745 – 0.750	High Intensity



Εικόνα 2.5: Σύστημα μέτρησης έντασης Almen [45]

## 2.5 Κάλυψη Επιφάνειας

Σαν κάλυψη ορίζεται ο λόγος της επιφάνειας που καλύπτεται από τις εσοχές που προκλήθηκαν από την σφαιριδιοβολή ως προς τη συνολική επιφάνεια που επεξεργάστηκε και εκφράζεται σαν ποσοστό. Η τυπική μέθοδος μέσω της οποίας εκτιμάται η συνολική κάλυψη είναι η οπτική εξέταση. Για πρακτικούς λόγους, θεωρούμε ότι η συνολική επιφάνεια που μπορεί να εξεταστεί μέσω της οπτικής εξέτασης είναι περίπου 98%, ωστόσο θεωρείται ότι εξετάζεται το 100%. Η εξέταση του 200% της επιφάνειας αναφέρεται στις περιπτώσεις στις οποίες γίνεται διπλή σφαιριδιοβολή για την εκτίμηση του 98% της επιφάνειας.

Οι Kirk et al. [44], το 2002 και το 2005, συζήτησαν στις αντίστοιχες θεωρίες τους για την εκτίμηση της κάλυψης της εξεταζόμενης επιφάνειας η οποία υποθέτει ότι τα σφαιρίδια τα οποία φτάνουν στην επιφάνεια είναι τυχαία κατανομημένα και έχουν σταθερό ρυθμό, ενώ οι οπές που σχηματίζονται είναι σφαιρικές και με σταθερό μέγεθος. Οι Kurappanan et al. (2003) [12], ανέπτυξαν αντίστοιχα δύο θεωρητικά μοντέλα τα οποία προβλέπουν την κάλυψη της επιφάνειας. Το ένα μοντέλο είναι η εξίσωση Anrami, η οποία απαιτεί τον καθορισμό της ακτίνας αναγνώρισης και της περιοχής εξάπλωσης και η άλλη είναι το μοντέλο Holdgate, το οποίο απαιτεί τον

καθορισμό της αναλογίας κάλυψης μετά από ένα συγκεκριμένο διάστημα σφαιριδιοβολής. Και οι δύο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιούν παραμέτρους οι οποίοι καθορίζονται από πειραματικά δεδομένα [12], [44].

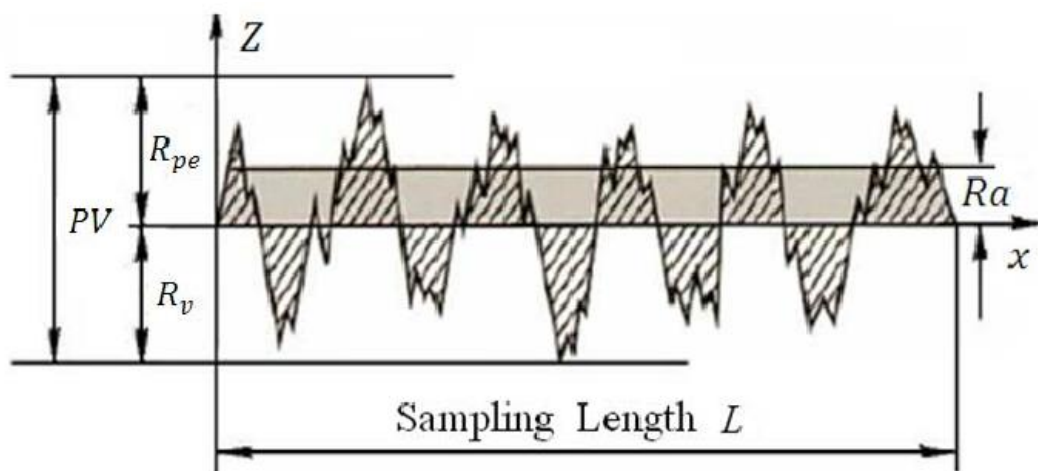
## 2.6 Τραχύτητα Επιφάνειας

Η τεχνική της σφαιριδιοβολής παράγει θλιπτική τάση στη επιφάνεια-στόχο, ωστόσο ταυτόχρονα αυξάνει και την τραχύτητα της επιφάνειάς της. Οι πιο κοινές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον καθορισμό της τραχύτητας της επιφάνειας στην σφαιριδιοβολή είναι η τραχύτητα από την κορυφή μέχρι το μέγιστο βάθος της καμπύλης PV, και η μέση τραχύτητα, όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα 2.6. Στην Εικόνα 2.6 η τιμή PV ορίζεται σαν η απόσταση ανάμεσα στην υψηλότερη κορυφή  $R_{pe}$  και στη χαμηλότερη κοιλάδα  $R_v$ , όπως φαίνεται και στην εξίσωση (2.1). Η μέση τραχύτητα ορίζεται σαν ο μέσος όρος της αριθμητικής απόκλισης μιας επιφάνειας από μια μέση γραμμή. Για ένα παράδειγμα με μήκος L, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (2.2) [46], [47].

$$PV = R_{pe} + R_v \quad (2.1)$$

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (2.2)$$





Εικόνα 2.6: Ο ορισμός της τραχύτητας [47]

## 2.7 Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων

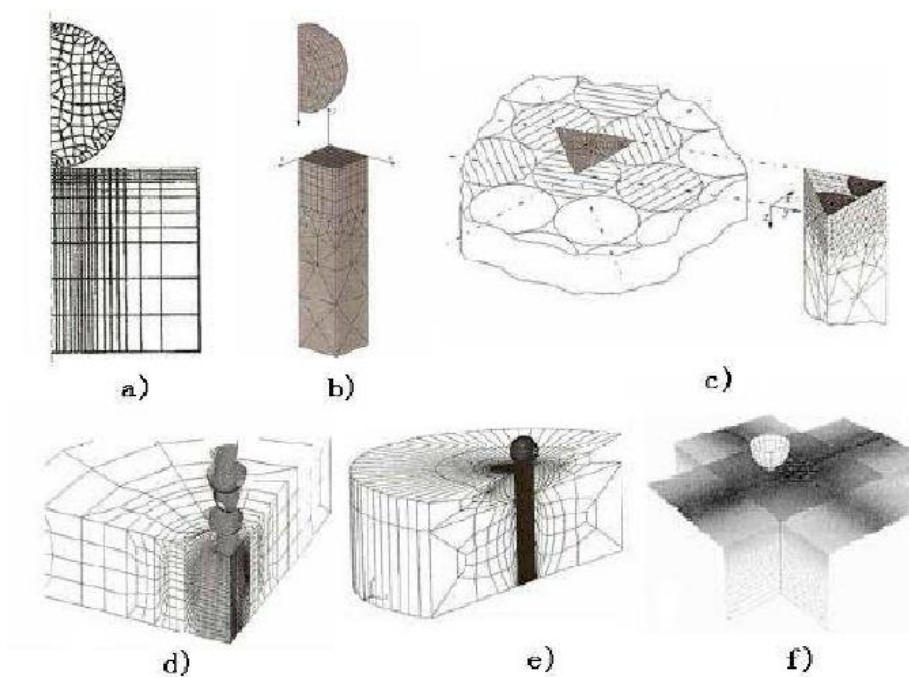
Η σφαιριδιοβολή είναι μια υβριδική κατεργασία, η οποία περιλαμβάνει ιδιότητες ελαστικότητας και πλαστικότητας καθώς και στατικές και δυναμικές αλλοιώσεις της επιφάνειας στην οποία εφαρμόζεται. Οι θεωρητικές μελέτες πάνω στη συγκεκριμένη τεχνική είναι περιορισμένες τις τελευταίες δεκαετίες [48], [49]. Η αριθμητική προσομοίωση της κατεργασίας έγινε εφικτή μέσω μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και την ανάπτυξη υπολογιστικής δύναμης στους σύγχρονους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Από τις πρώτες προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, ήταν η προσομοίωση που χρησιμοποιούσε τρισδιάστατα ισοπαραμετρικά στερεά στοιχεία και ένα μείγμα από 9 επίπεδα στοιχείων μέσω του πάχους της επιφάνειας στόχου. Συνεπώς, σχηματίστηκαν έξι κύριοι τύποι μοντέλων οι οποίοι προσομοίωσαν την σφαιριδιοβολή.

- Αξονοσυμμετρικό μοντέλο το οποίο προσομοίωνε την παραμόρφωση της επιφάνειας από τους Mori et al., Εικόνα 2.7a [47].
- Περιοδικό συμμετρικό κελί που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια στόχο από τους Meguid et al., Εικόνα 2.7b [51].
- Τρισδιάστατο μοντέλο με ισόπλευρο τρίγωνο της επιφάνειας πρόσκρουσης και τρεις συμμετρικές επιφάνειας το οποίο είχε στόχο τη μελέτη των παρακείμενων βολών από τους Schifnner et al., Εικόνα 2.7c [52].

- Προσομοίωση πολλαπλών προσκρούσεων ανάμεσα στις βολές και την επιφάνεια χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο με δύο συμμετρικές επιφάνειες, Edberg et al., 1995, Εικόνα 2.7d [53].
- Ημικυκλικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με μια συμμετρική επιφάνεια όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7e, ώστε να προσομοιωθεί η πρόσκρουση μιας βολής με πλάγια γωνία πρόσπτωσης, Al-Hassani et al., 1999 [54].
- Τρισδιάστατο μοντέλο χωρίς όρια συμμετρίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7f, Schwarzer et al., 2003 [55].

Από τα παραπάνω μοντέλα το αξονοσυμμετρικό μοντέλο είναι αυτό που είναι το μικρότερο από άποψη βαθμών ελευθερίας [50]–[55].

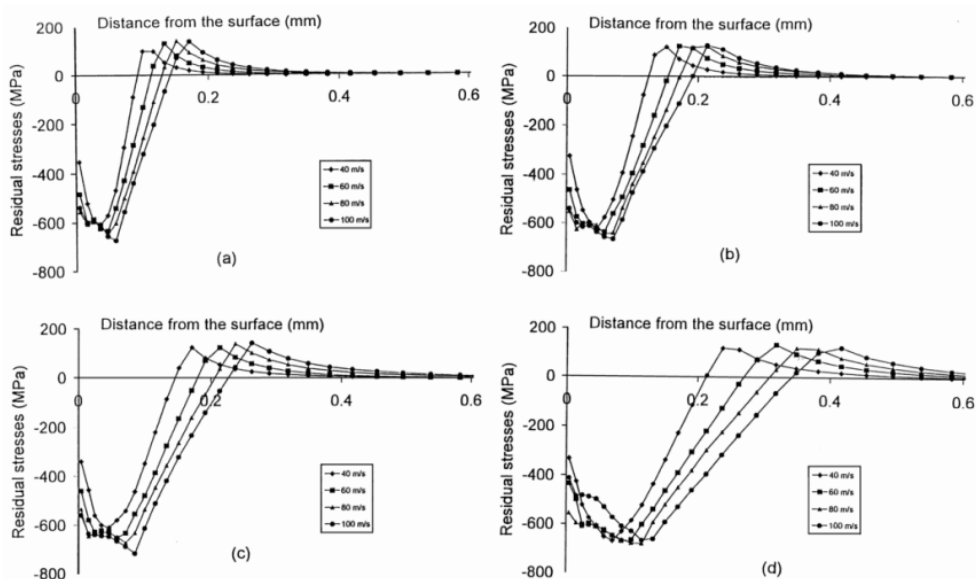


**Εικόνα 2.7:** 6 τύποι μοντέλων που προσομοιώνουν τη κατεργασία της σφαιριδιοβολής.

## 2.8 Αποτελέσματα της ταχύτητας βολής και του μεγέθους βολής

Οι Al-Obaid et al. (1990) [48], αναλύουν την επιρροή της ταχύτητας της βολής στο προφίλ της παραμένουσας τάσης με ένα τρισδιάστατο δυναμικό μοντέλο το οποίο έλαβε υπ' όψιν την ελαστοπλαστικότητα του στόχου. Αντίστοιχα, οι Meguid et al. (1999) [51], μελέτησαν τα αποτελέσματα της ταχύτητας της βολής καθώς και του μεγέθους και του σχήματος των σφαιριδίων στις χρονικές ακολουθίες των ισοδύναμων της πλαστικής παραμόρφωσης με τη μέθοδο του Fe [48], [51].

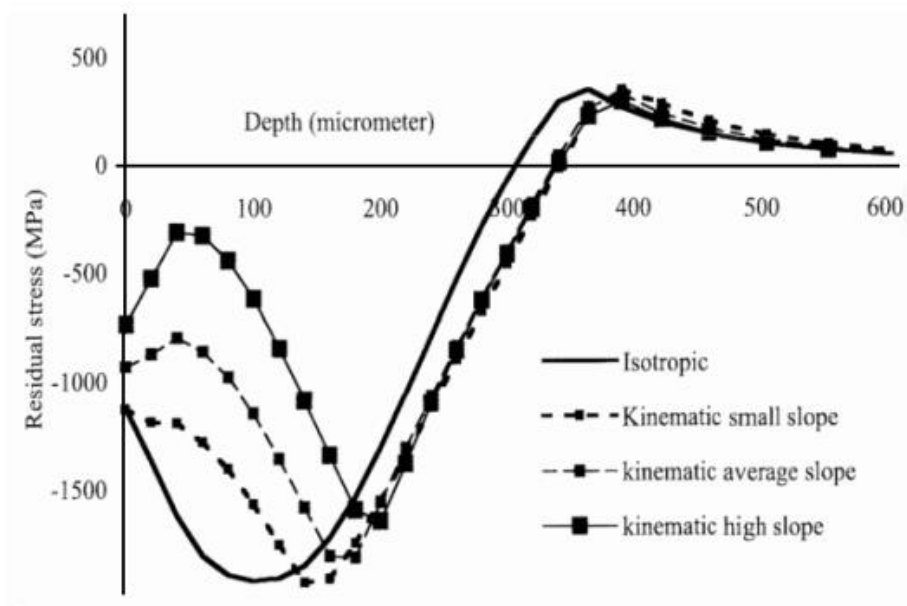
Ο Guagliano (2001) [42], υπολόγισαν επίσης την επιρροή της ταχύτητας και του μεγέθους των σφαιριδίων στην πλαστική παραμόρφωση χρησιμοποιώντας το μοντέλο που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.8. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην ίδια εικόνα και υποδεικνύουν το βάθος της μέγιστης θλιπτικής παραμένουσας τάσης και το βάθος στο οποίο η τάση αυτή αλλάζει ανάλογα με την ταχύτητα και την διάμετρο των σφαιριδίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πεδίο της παραμένουσας τάσης φτάνει σε μια κατάσταση κορεσμού μετά από ένα περιορισμένο αριθμό προσκρούσεων. Επιπλέον, από τα αποτελέσματα της ίδιας μελέτης φαίνεται ότι η κατανομή της παραμένουσας τάσης είναι άμεσα εξαρτώμενη από την ταχύτητα πρόσκρουσης και ότι μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό κρούσεων επιτυγχάνεται μια ομοιόμορφη κατάσταση τάσεως [42].



**Εικόνα 2.8:** Προφίλ παραμένουσας τάσης λόγω σφαιριδιοβολής σε υλικό μεγάλου πάχους με βολές σφαιριδίων διαφορετικής διαμέτρου (0,3mm, 0,5 mm, 0,7 mm και 1,0 mm) [42]

## 2.9 Ανάπτυξη παραμένουσων τάσεων σε σχέση με τις ιδιοότητες του υλικού

Οι Schwarzer et al. (2003) [55], μελέτησαν την επιρροή της συμπεριφοράς του υλικού στην παραμένουσα τάση χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χωρίς συμμετρία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το υψηλότερο όριο ελαστικότητας (yield stress) προκαλεί αρκετά μεγαλύτερες τιμές παραμένουσας τάσης. Συμπερασματικά, αναφέρουν ότι η παραμένουσα τάση που παράγεται από τη σφαιριδιοβολή, καθορίζεται κυρίως από το όριο ελαστικότητας και όχι από το πώς σκληραίνει το υλικό. Τα αποτελέσματα άλλων ερευνών έδειξαν επίσης ότι σε ένα κινηματικό μοντέλο, το προφίλ της παραμένουσας τάσης αλλάζει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την αλλαγή της κλίσης σκλήρυνσης στην αντίστοιχη καμπύλη (Εικόνα 2.9). Πιο αναλυτικά, η αύξηση της κλίσης αυτής δείχνει αρχικά μια μείωση της τάσης κοντά στην επιφάνεια του υλικού, μετά μια αύξηση στη μέγιστη τιμή και τελικά μια μείωση, ώστε να φτάσει στην τιμή της τάσης εφελκυσμού [55], [56].

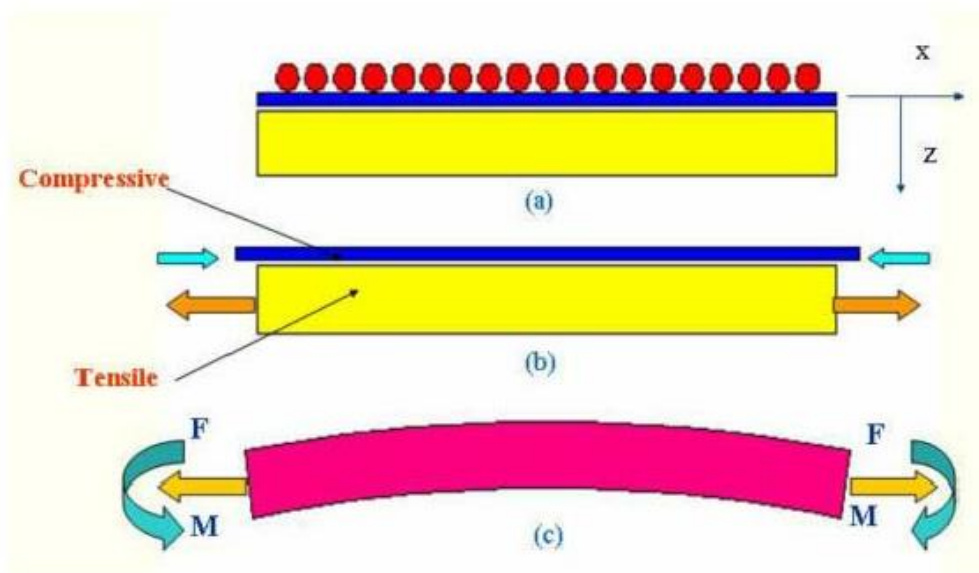


**Εικόνα 2.9:** Η σχέση μεταξύ της παραμένουσας τάσης και της σύστασης του υλικού [55]

## 2.10 Τυπική σφαιριδιοβολή

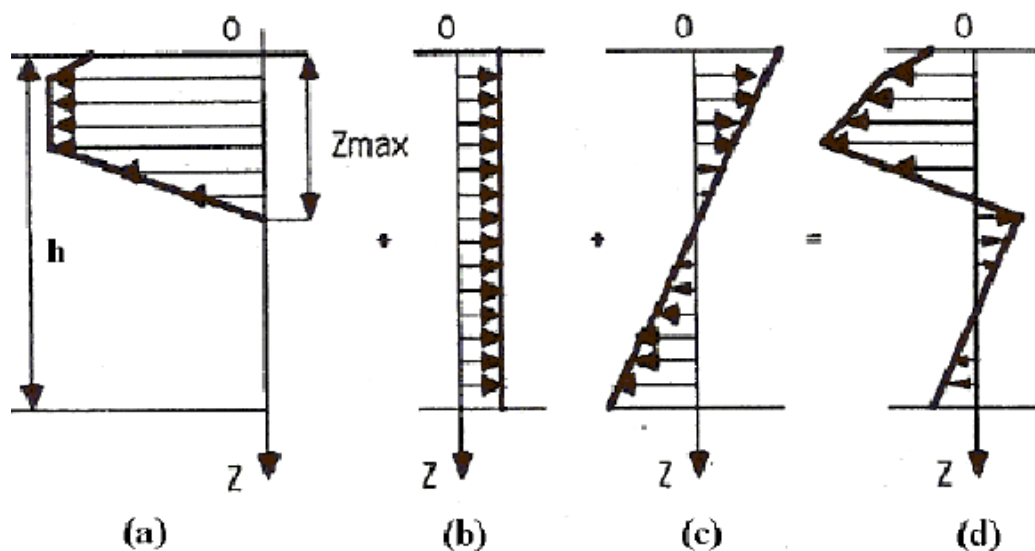
Η τεχνική που μελετάμε στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί για να καμπυλώσει τις επιφάνειες φτερωτών αεροσκαφών από το 1968 και θεωρείται σαν μία από τις σημαντικότερες τεχνικές που αναπτύχθηκαν στην αεροναυπηγική. Η τεχνική, εφαρμόζεται σε μία ή και τις δύο πλευρές του υλικού με διάφορες εντάσεις ώστε το τμήμα του υλικού στο οποίο εφαρμόζεται να λάβει το επιθυμητό σχήμα.

Αφού η επιφάνεια του τμήματος χτυπηθεί κατ' επανάληψη με σφαιρίδια με μεγάλη ταχύτητα, ένα λεπτό πλαστικό τμήμα θα προκαλέσει παραμένουσα τάση στην επιφάνεια του υλικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9. Για ένα τμήμα της κατασκευής το οποίο είναι σταθεροποιημένο με σφικτήρες ή κάποιο παρόμοιο τρόπο, η προκαλούμενη τάση είναι σε μια κατάσταση μη ισορροπίας. Μετά την κατάργηση των οριακών συνθηκών, δημιουργείται μια μόνιμη κύρτωση στο υλικό και τελικά μια ισορροπία της παραμένουσας τάσης. Επομένως, από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η παραμένουσα τάση είναι το αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ δύο τάσεων (κάμψεως και έκτασης).



**Εικόνα 2.10:** Η διαδικασία της σφαιριδιοβολής: (α) αρχικά πολλαπλά σφαιρίδια προσκρούουν σε ένα λεπτό τμήμα υλικού. (β) Πλαστική παραμόρφωση και θλιπτική τάση. (γ) Δύναμη κάμψης (F) και δύναμη έκτασης (M) οι οποίες προκαλούν στο υλικό έκταση και κάμψη.

Οι Guechichi et al. (2013), υπέθεσαν ότι η κατανομή της παραμένουσας τάσης σε ένα υλικό είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 2.10 [57]. Η κατανομή αυτή προέρχεται από το άθροισμα τριών προφίλ τάσεως: την τάση που προκαλείται από την σφαιριδιοβολή, την τάση που προκαλείται από την στρέβλωση και την τάση που προκαλείται από την κάμψη [57].



**Εικόνα 2.11:** Σχηματική αναπαράσταση της παραμένουσας τάσης μετά την σφαιριδιοβολή: α) προφίλ τάσεως, β) προφίλ τάσεως κάμψης, γ) προφίλ παραμένουσας τάσης και δ) προφίλ θλιπτικής τάσης [57]

### 3. Εφαρμογές Σφαιριδιοβολής στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα οι εταιρίες που εφαρμόζουν την κατεργασία της σφαιριδιοβολής δεν είναι πολλές, καθώς είναι πιο διαδεδομένη η συγγενής κατεργασία της αμμοβολής. Αμμοβολή (Sandblasting) είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την εκτόξευση πολύ μικρών κόκκων άμμου με υψηλή ταχύτητα για να καθαριστεί ή να χαραχτεί μια επιφάνεια. Η πρώτη αμμοβολή κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στις ΗΠΑ το 1870. Ως μέθοδος καθαρισμού, συχνά χρησιμοποιείται για την προετοιμασία μιας επιφάνειας για την εφαρμογή της βαφής ή μονωτικών. Λόγω των κινδύνων εισπνοής σκόνης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απαιτείται ειδικός εξοπλισμός και απαραίτητη τεχνογνωσία, η αμμοβολή ελέγχεται προσεκτικά και κρίνεται απαραίτητη η χρήση μιας εναλλακτικής παροχής αέρα, προστατευτικά ενδύματα και σωστό αερισμό.

Η αμμοβολή είναι μια κατεργασία φινιρίσματος επιφάνειας που περιλαμβάνει τη χρήση ενός μηχανοκίνητου μηχανήματος, συνήθως ενός αεροσυμπιεστή καθώς και μιας μηχανής αμμοβολής, για την εκτόξευση πλήθος σωματιδίων υπό υψηλή πίεση σε μια επιφάνεια. Μια εγκατάσταση αμμοβολής συνεπώς, αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη συνήθως: τη λειαντική άμμο, έναν αεροσυμπιεστή, και ένα ακροφύσιο εκτόξευσης. Η κατεργασία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για να καθαρίσει μια επιφάνεια από οτιδήποτε μπορεί να παραμένει προσκολλημένο σε αυτήν. Έτσι, με τη εκτόξευση μικροκόκκων άμμου στην επιφάνεια σε υψηλή ταχύτητα, όλες οι ατέλειες αφαιρούνται και μπορεί στη συνέχεια η επιφάνεια εύκολα να ξεπλυθεί, δημιουργώντας μια λεία επιφάνεια πάνω στην οποία θα εφαρμοστεί το νέο στρώμα του χρώματος. Η αμμοβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην αφαίρεση σκουριάς.

Το πρώτο βήμα για την εκτέλεση της κατεργασίας αυτής, είναι η εναπόθεση της άμμου στη μηχανή αμμοβολής. Οι μηχανές αμμοβολής διαθέτουν ένα θάλαμο στην κορυφή, στον οποίο χύνεται η άμμος. Στη συνέχεια, η μηχανή αμμοβολής συνδέεται σε έναν συμβατικό αεροσυμπιεστή ο οποίος, όταν ενεργοποιηθεί, ωθεί την άμμο μέσω ενός ακροφυσίου. Ανάλογα με τις ρυθμίσεις, η πίεση της άμμου που εκτοξεύεται μπορεί να είναι από 3.45 έως 8.96 bar [58]. Έπειτα, η άμμος εκτοξεύεται σε όλη την επιφάνεια και λόγω των λειαντικών ιδιοτήτων της, η άμμος μπορεί να δημιουργήσει μια πιο ομαλή επιφάνεια [59]. Το σκυρόδεμα, για παράδειγμα, συχνά υπόκειται σε αμμοβολή. Αφού χυθεί το σκυρόδεμα και αφηθεί να στεγνώσει, υποβάλλεται σε κατεργασία

αμμοβολής [58]. Η κατεργασία αφαιρεί περιττό υλικό από το σκυρόδεμα, κάνοντάς το ομαλότερο.

Η διαφορά στις δύο κατεργασίες, όπως είναι και ονομαστικά εμφανές, έγκειται στη χρήση των υλικών. Στην αμμοβολή εκτοξεύεται άμμος πάνω σε μια επιφάνεια, ενώ στην σφαιριδιοβολή μικρές μεταλλικές σφαίρες εκτοξεύονται σε μια επιφάνεια. Τα διάφορα υλικά που απαρτίζουν τις μεταλλικές σφαίρες είναι σκληρότερα από την άμμο, καθιστώντας την σφαιριδιοβολή πιο αποτελεσματική [58]. Παρακάτω, θα αναφερθούν διάφορες εταιρίες και εφαρμογές των δύο αυτών κατεργασιών στην Ελλάδα.

### 3.1 Σφαιροβολή

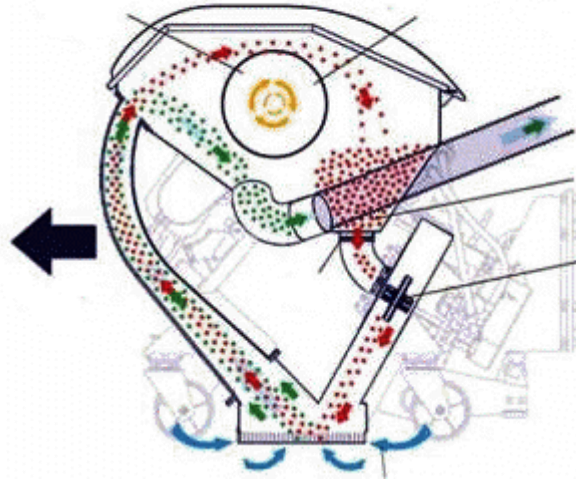
Η "ΣΦΑΙΡΟΒΟΛΗ" είναι Ελληνική εταιρεία, με πιστοποιημένο από την TUV NORD προσωπικό, που εξειδικεύεται στην [60]:

- Προεπεξεργασία βιομηχανικών δαπέδων (ετοιμασία για διάστρωση εποξειδικών βαφών).
- Αδροποίηση ασφαλτικών οδοστρωμάτων (δημιουργία αντιολισθητικού ασφαλτοτάπητα).
- Αφαίρεση διαγραμμίσεων (βιομηχανικών χώρων & ασφαλτοταπήτων).
- Καθαρισμό μεταλλικών επιφανειών στην πετροχημική βιομηχανία & σε Οχηματαγωγά σκάφη

Η συγκεκριμένη εταιρία, για την επιτάχυνση και βολή των ατσαλοσφαιριδίων (διαμέτρου 0,8mm - 2,00mm αναλόγως της εργασίας) χρησιμοποιεί ειδικές ταχύστροφες φυγοκεντρικές κεφαλές που εκτοξεύουν τα ατσαλοσφαιρίδια με πολύ μεγάλη ταχύτητα σε μορφή "βεντάλιας" και όχι συγκεντρωτικού κώνου όπως στην τυπική αμμοβολή [60]. Ο τρόπος που λειτουργεί το μηχάνημα είναι εμφανής στην Εικόνα 3.1. Τα ατσαλοσφαιρίδια (κόκκινα σφαιρίδια) χτυπούν υπό γωνία την προς καθαρισμό επιφάνεια, αναπηδούν και συλλέγονται από την μηχανή μαζί με την σκόνη και με το υλικό που έχει αφαιρεθεί από το δάπεδο (πράσινα σφαιρίδια) . Το



υλικό φιλτράρεται από ειδική απορροφητική διάταξη, συλλέγεται σε σφραγισμένο δοχείο και στο περιβάλλον βγαίνει μόνον καθαρός αέρας.



**Εικόνα 3.1:** Τυπικό συγκρότημα σφαιριδιοβολής και τρόπος λειτουργίας [60].

Σύμφωνα με την εταιρία, η ρίψη των ατσαλοσφαιριδίων υπό μορφή βεντάλιας και όχι συγκεντρωτικά, όπως με τα μπέκ αμμοβολής, παρέχει μεγάλη παραγωγικότητα σε σχέση με την τυπική διαδικασία αμμοβολής [60]. Αναλόγως της υφής και σκληρότητας του δαπέδου και της ζητούμενης ποιότητας μικροεκτράχυνσης, καθώς και των ρυθμίσεων της μηχανής, η παραγωγή καθαρής και μικροπορώδους επιφάνειας είναι δυνατόν να φθάσει τα 3.000m<sup>2</sup> [60].

### 3.2 Maycon

Η ιστορία του ΟΜΙΛΟΥ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ ΜΑΪΔΗΣ ξεκίνησε το 2002 στο Ρέθυμνο της Κρήτης και αρχικά επικεντρώθηκε στην οδική σήμανση και ασφάλεια, ενώ σταδιακά ανέπτυξε τις δραστηριότητές της [61]. Από το 2002, ο όμιλος επεκτάθηκε σε όλη την Ελλάδα, στην αγορά των Βαλκανίων και στην ευρύτερη ζώνη της Ευρώπης, με την ίδρυση θυγατρικών εταιρειών. Στόχος του Ομίλου είναι η ανάληψη και εκτέλεση δημοσίων και ιδιωτικών έργων, με έμφαση στην οριζόντια - κατακόρυφη οδική σήμανση (όπως Εθνικά και επαρχιακά Οδικά Δίκτυα, Αεροδρόμια, εθνικές οδοί κλπ) [61].

Η Maycon Greece είναι η ναυαρχίδα του Ομίλου ΜΑΪΔΗΣ και η πρώτη εταιρεία που ιδρύθηκε το 2002 [61]. Μέχρι σήμερα η εταιρεία έχει εκτελέσει μεγάλα και σημαντικά έργα για την Ελλάδα, σε κομβικά σημεία, για την ασφάλεια των αυτοκινητοδρόμων του Ελλαδικού Χώρου, όπως έργα διαγράμμισης, σήμανσης οδών, τοποθέτηση ειδικών ανακλαστήρων σε στηθαία ασφαλείας και διαχωριστικά εθνικών οδών, έργα βαφής γεφυρών με χρώματα "anti-graffiti" (Αντιρρυπαντική στρώση), έργα επίστρωσης της ασφάλτου με ειδικά έγχρωμα αντιολισθητικά συστήματα κτλ [61]. Το 2015 ιδρύθηκε η Maycon Poland, προκειμένου να ανταποκριθεί στις αυξανόμενες ανάγκες της αγοράς [61]. Στη συνέχεια, ιδρύθηκε η Maycon Romania στο Βουκουρέστι ως εταιρεία οδικής σήμανσης και χρωμάτων διαγράμμισης, το 2016 [61]. Ο βασικός στόχος της είναι η ανάληψη και ολοκλήρωση έργων οδικών διαγραμμίσεων, οριζόντιας και κατακόρυφης σήμανσης σε όλη την Ρουμανική επικράτεια. Τέλος, στις αρχές του 2017 ιδρύθηκε η MAYCON ROAD SAFETY CZECH s.r.o., με αποτέλεσμα ο όμιλος ΜΑΪΔΗ να επεκταθεί επιτυχώς και στην Τσέχικη Δημοκρατία [61].

Ο όμιλος είναι άρτια εξοπλισμένος με μηχανήματα τελευταίας τεχνολογίας οδικής σήμανσης, υδροβολής, σφαιριδιοβολής και steel blasting κτλ. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την κατεργασία της σφαιριδιοβολής, εμφανίζεται παρακάτω στις Εικόνες 3.2 έως 3.5.



**Εικόνα 3.2:** Mercedes Benz 2-45DTM [61]



**Εικόνα 3.3:** Renault 2-45DTM [61]



**Εικόνα 3.4:** MAN 2-45DTM [61]



**Εικόνα 3.5:** BMR - 85D [61]

### 3.3 Οικονομου Design & Construction

Γνωστή και ως Shotblasting.gr, είναι η πρώτη ελληνική εταιρία που εφάρμοσε την κατεργασία της σφαιριδιοβολής τον Μάιο του 2008 [62]. Η εταιρία αυτή ειδικεύεται στην κατεργασία του οδοστρώματος, ώστε να ανακτήσει τις αντιολισθητικές του ιδιότητες [62]. Σημαντικά έργα, όπου η εταιρία εφάρμοδε τη μέθοδο της σφαιριδιοβολής, είναι η Αττική Οδός, η Κ/Ξ Άπιον Κλέος, η Τέρνα Α.Ε. και ο Άκτωρ Α.Τ.Ε.

### 3.4 Vernicol

Η εταιρεία ΒΕΡΝΙΚΟΛ ΑΤΕΒΕ ΑΕ ξεκίνησε την δραστηριότητα της από το 1968 [63]. Σήμερα ο όμιλος περιλαμβάνει εταιρείες με εργοληπτικά πτυχία, για την εκτέλεση δημοσίων έργων, αλλά και εταιρείες με συμπληρωματικές δραστηριότητες οι οποίες στελεχώνονται με εξειδικευμένο προσωπικό και τεχνογνωσία για την αρτιότερη υλοποίηση των έργων της [63]. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιεί, σύμφωνα με τα στοιχεία της ιστοσελίδας της εταιρίας, είναι ο ίδιος με την εταιρία Maycon που αναφέρθηκε παραπάνω και εξειδικεύεται στους αυτοκινητόδρομους σκυροδέματος, τα ολισθηρά οδοστρώματα, τους αεροδιαδρόμους, τις γέφυρες και τα τούνελ [63]. Οι σημαντικότεροι σταθμοί στην ιστορία της εταιρίας, σχετικά με το παρόν θέμα, συνοψίζονται παρακάτω [63]:

- **1968:** Ίδρυση της TYP-SOL
- **1986:** Μετατροπή της TYP –SOL σε ΒΕΡΝΙΚΟΛ Α.Ε.
- **1986:** Σύναψη συνεργασίας με την Ιταλική Βιομηχανία βερνικιών SIRCAR.L.
- **1989:** Είσοδος στα χρώματα διαγράμμισης, και σύναψη συνεργασίας με την Γαλλική εταιρεία MAESTRIA
- **1993:** Αποκλειστική συνεργασία με την DEGUSSA Γερμανίας και μεταφορά τεχνογνωσίας για την παραγωγή δύο συστατικών ψυχοπλαστικών υλικών διαγράμμισης
- **2008:** Αποκλειστική αντιπροσώπευση της SOVITEC στην Ελλάδα και σύναψη συμφωνίας με τη MCBAUCHEMIE
- **2009:** Απόκτηση των επιπλέον δύο νέων μηχανημάτων διαγράμμισης, προσαυξάνοντας έτσι το βαρύ εξοπλισμό των θυγατρικών εταιρειών, με 5 αυτοματοποιημένα σύγχρονα φορτηγά διαγράμμισης

- **2011:** Ίδρυση θυγατρικών εταιρειών σε Βαλκανικές και Αραβικές χώρες με σκοπό την επέκταση της δραστηριότητας της, με ανταγωνιστική τεχνογνωσία και προϊόντα

### **3.5 ΣΤΕΛΜΑ Α.Τ.Ε.**

Η ΣΤΕΛΜΑ Α.Τ.Ε. (λατινικά STELMA T.S.A.) αποτελεί το βασικό “πυλώνα” του Ομίλου Εταιρειών STELMA, συστάθηκε νομικά το Δεκέμβριο του 2002 και αποτελεί συνέχεια της “ΣΤΕΛΜΑ Εταιρία Περιορισμένης Ευθύνης Αντισκωριακής Προστασίας Επιφανειών”, από την οποία προέκυψε, σαν αποτέλεσμα της μετατροπής της σε Ανώνυμη Εταιρεία [64]. Η ΣΤΕΛΜΑ Ε.Π.Ε. ιδρύθηκε το 1990 από τον Ελευθέριο Μαμαντζή, με αντικείμενο εργασιών την αντιδιαβρωτική προστασία επιφανειών [64]. Η σκοπιμότητα της ίδρυσης της ΣΤΕΛΜΑ Ε.Π.Ε., της οποίας προηγήθηκε η ίδρυση άλλων εταιρειών συμφερόντων Ελ. Μαμαντζή από το 1980, επιβλήθηκε από την ανάγκη δημιουργίας μιας σύγχρονης εταιρείας ικανής να παρέχει υπηρεσίες προστασίας επιφανειών σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα καλύπτοντας όχι μόνο τις ανάγκες της εγχώριας αγοράς, αλλά και των διεθνών αγορών χωρών, όπως είναι οι χώρες της Βαλκανικής, η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, οι χώρες της Ανατολικής Ευρώπης καθώς και οι χώρες της Μέσης Ανατολής [64].

Στο πλαίσιο της μετατροπής της ΣΤΕΛΜΑ Ε.Π.Ε. σε ΣΤΕΛΜΑ Α.Τ.Ε., έγινε επέκταση του καταστατικού σκοπού της εταιρείας, ο οποίος περιλαμβάνει εκτός της αντισκωριακής προστασίας, βιομηχανικές μονώσεις, ηλεκτρο - μηχανολογικές εργασίες καθώς και κατασκευαστικά – οικοδομικά έργα. Η ΣΤΕΛΜΑ Α.Τ.Ε. εδρεύει στο κέντρο της Θεσσαλονίκης, ενώ διαθέτει και εργοστασιακή μονάδα στο Δήμο Ωραιοκάστρου (Νεοχωρούδα) [64]. Διαθέτει υποκαταστήματα τόσο στο εσωτερικό (Αθήνα και Πτολεμαΐδα) όσο και στο εξωτερικό (Γαλλία / Σεν Ναζέρ) ενώ διατηρεί θυγατρικές εταιρείες στο Ηνωμένο Βασίλειο (Λονδίνο), στη Βουλγαρία (Σόφια), στην Πολωνία (Βαρσοβία) και στο Κουβέιτ (Αλ Άχμαντι) ενώ επίκειται η ίδρυση θυγατρικής στο Κατάρ εντός του προσεχούς διαστήματος [64].

Η εταιρία αυτή εξειδικεύεται, μεταξύ άλλων, στην κατεργασία της αμμοβολής για την αντιδιαβρωτική προστασία επιφανειών. Η ΣΤΕΛΜΑ Α.Τ.Ε. εξελίσσεται τεχνολογικά και διαθέτει σύγχρονο εξοπλισμό στον τομέα της αμμοβολής και μεταλλοβολής, διαθέτοντας εκτός των άλλων πύργο αμμοβολής, συστήματα αμμοβολής κλειστού

κυκλώματος, μηχανές αναρρόφησης άμμου (vacuum recovery systems), αυτόματες αμμουδιέρες,, αυτόματα συστήματα εσωτερικής αμμοβολής σωληνώσεων κτλ. [64]. Τέλος, έχει προσφέρει της υπηρεσίες της σε κατεργασίες, επισκευές και συντηρήσεις πολλών έργων, όπως ο πύργος του Αιφελ, η σύραγγα Κουξ, μονάδες προπυλενίου, φρεγάτα “Guepratte”, τα κρουαζιερόπλοια “Harmony of the Seas” - “Meraviglia” - “Divina” - “Fantasia” - “Preziosa” - “Poesia” - “Musica” - “Magainifica” - “Splendida” - “Nowrwegian Epic” και πολλά ακόμα πλοία και έργα [64].

### **3.6 Άμμος και Χρώμα Χαρίστας**

Η εταιρία “Άμμος & Χρώμα” εξειδικεύεται στην αμμοβολή και τη βαφή με έδρα στη Θεσσαλονίκη και συγκεκριμένα στην περιοχή Β’ ΚΤΕΟ [65]. Ιδρύθηκε το 1988 με σκοπό την κάλυψη των αναγκών κάθε επαγγελματία, επιχείρησης και ιδιώτη [65].

Οι βασικές κατηγορίες των υπηρεσιών που προσφέρει η Άμμος & Χρώμα είναι η αμμοβολή και η βαφή. Αναλυτικότερα, μπορεί να πραγματοποιήσει εξωτερικό καθαρισμό κτιρίων με αμμοβολή και χημικά μέσα. Ακόμα, αναλαμβάνει υδραμμοβολή, αμμοβολή με ειδικά υλικά για κατασκευές INOX και για μαλακά μέταλλα. Τέλος, πραγματοποιεί αμμοβολή στημένων κατασκευών ανεξαρτήτως ύψους, ξύλινων κατασκευών και μικροεπίπλων, καθώς και μαρμάρων [65].

Ενδιαφέρον έχουν και οι κατά προσέγγιση χρόνοι, σύμφωνα με την εταιρία, για συγκεκριμένα έργα. Για αμμοβολή, βαφή με εποξικό αστάρι και βαφή με χρώματα 2 συστατικών σε σασί διαζονικού – τριαζονικού τράκτορα, υπολογίζεται διάρκεια 4 με 5 ημέρες (εργάσιμες). Για αμμοβολή, βαφή με εποξικό αστάρι και βαφή με χρώματα 2 συστατικών σε σασί τριαζονικού – τετραζονικού αυτοκινήτου, υπολογίζεται διάρκεια 5 με 6 ημέρες (εργάσιμες). Τέλος, για αμμοβολή, βαφή με εποξικό αστάρι και βαφή με χρώματα 2 συστατικών σε σασί διαζονικής καρότσας “ρυμούλκα”, υπολογίζεται διάρκεια 4 με 5 ημέρες (εργάσιμες) [65].

### **3.7 Pytheas Group**

Η ομάδα του Πυθέα έχει πάνω από δέκα χρόνια εμπειρίας στις αμμοβολές, τις υδραμμοβολές, τις υδροβολές υψηλής πίεσης και την εφαρμογή συστημάτων βαφής.

Στο εμπορικό κομμάτι αντιπροσωπεύουν την Ολλανδική Sibelco [66]. Είναι επίσης αντιπρόσωποι της Γαλλικής Norexco S.A. σε μηχανήματα αμμοβολής και αντλίες Airless, της Ιταλικής Rotair Spa σε Diesel και ηλεκτρικούς αεροσυμπιεστές και της Αμερικάνικης Farrow System σε μηχανές υδροαμμοβολής [66].

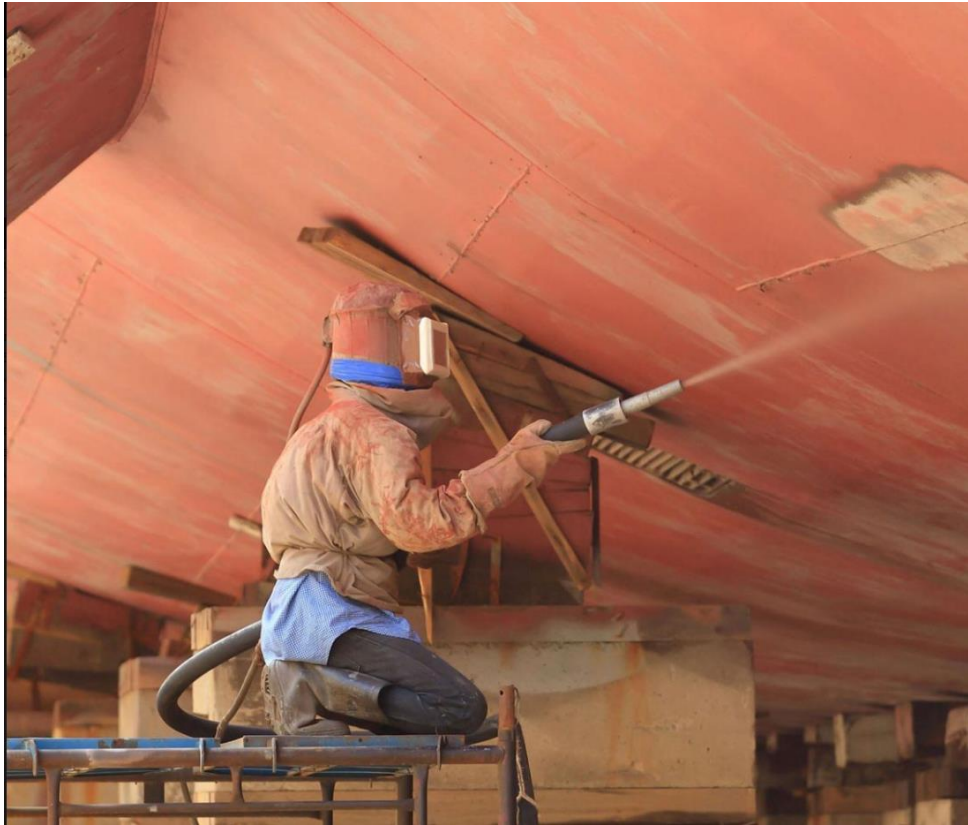
Η Pytheas Group ως αντιπροσώπος της SIBELCO – EUROGRIT, παρέχει την πλήρη γκάμα των 30+ υλικών αμμοβολής. Η εταιρία δηλώνει, πως όλα τα υλικά αμμοβολής που διαθέτουν περιέχουν < 1% ελεύθερα κρυσταλλικά πυρίτια, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία αμμοβολής [66]. Τέλος, στην ιστοσελίδα της Pytheas Group αναγράφεται, πως ο σύγχρονος εξοπλισμός τους προσδίδει ένα δυναμικό αμμοβολής ανά ημέρα 100 – 200 m<sup>2</sup>, ανάλογα με την ζητούμενη καθαρότητα και την υπό κατεργασία επιφάνεια. Το δυναμικό βαφής ανά ημέρα με τα τρία συστήματα Airless είναι πολλαπλάσιο.

### **3.8 Balcan Blast**

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της BalkanBlast, δημιουργήθηκε για να καλύψει όλες τις ανάγκες ενός βιομηχανικού blasting και βαφής με επαρκή εξοπλισμό και προσωπικό για οποιονδήποτε όγκο εργασίας της ανατεθεί σε ηλεκτρολογικό και μηχανολογικό εξοπλισμό [67]. Η εταιρία υποστηρίζει, πως είναι εφικτό να αναλάβει εργασίες με κινητά συνεργεία σε όλη την Ελλάδα αλλά και σε άλλες Βαλκανικές χώρες με εξειδίκευση στους τομείς της παγοβολής, παγοβολής με grit blast, Υδροβολής / Υδροαμμοβολής, Αμμοβολής / Μεταλλοβολής και Βιομηχανικής βαφής [67].

Αναγνωρίζοντας τις σύγχρονες τάσεις στον τομέα της πιστοποίησης και την σπουδαιότητα παροχής ολοκληρωμένων υπηρεσιών, η Balkan Blast έχει πιστοποιηθεί για το σύστημα διαχείρισης της ποιότητας κατά ISO 9001:2015 από την EuroCert, όσον αφορά υπηρεσίες καθαρισμού επιφανειών ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και τεχνικών έργων με την μέθοδο της παγοβολής, υδροβολής/υδροαμμοβολής, αμμοβολής/μεταλλοβολής, και βιομηχανικής βαφής [67].





**Εικόνα 3.3:** Εφαρμογή κατεργασίας αμμοβολής σε μεταλλική επιφάνεια πλοίου [67]



## 4. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, παρατηρείται χρήση της κατεργασίας της σφαιριδιοβολής από αρκετές μεγάλες εταιρίες στην Ελλάδα, όμως υπάρχουν ακόμα αρκετοί φορείς που δεν εκμεταλλεύονται την κατεργασία αυτή στο έπακρο ή και καθόλου. Ολοκληρώνοντας, θεωρείται χρήσιμη η αναφορά των πλεονεκτημάτων της σφαιριδιοβολής, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που εξετάστηκε, ώστε να κινητοποιηθούν περισσότερες εταιρίες και οργανισμοί προς τη χρήση τέτοιων αποτελεσματικών και οικολογικών κατεργασιών. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι προαναφερθέντες αναφορές των πλεονεκτημάτων της σφαιριδιοβολής.

<b>Πλεονεκτήματα</b>	
<b>1</b>	Επέκταση διάρκειας ζωής ενός εξαρτήματος
<b>2</b>	Αύξηση της αντίστασης στην κόπωση, τη διάβρωση, τη θλίψη κλπ.
<b>3</b>	Βοηθά στην αντίσταση στην ανάπτυξη και διάδοση ρωγμών
<b>4</b>	Μειώνει την απορροφητικότητα ατόμων υδρογόνου από το μέταλλο
<b>5</b>	Αυξάνει τη λιπαντικότητα δημιουργώντας μικρούς πόρους στους οποίους μπορούν να συσσωρευτούν λιπαντικά
<b>6</b>	Κόστος περίπου στο 1/5 από το κόστος καινούργιας ασφαλικής στρώσης
<b>7</b>	Δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, διότι δεν υπάρχουν κατάλοιπα στον δρόμο, εφόσον αυτά απορροφούνται από το ίδιο το μηχάνημα και αποθηκεύονται σε big bags
<b>8</b>	Όσο η κατεργασία λαμβάνει μέρος, δεν εμποδίζει στη κυκλοφορία του δρόμου
<b>9</b>	Η όλη διαδικασία γίνεται με ένα πέρασμα του μηχανήματος

**Πίνακας 4.1:** Αναφορά αποτελεσματικότητας της σφαιριδιοβολής [68]

## Βιβλιογραφία

- [1] M. Samatham, R. Naik, B. Reddy, and G. Kumar, “A Study on Improvement of Fatigue Life of materials by Surface Coatings,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 8, Jan. 2018, doi: 10.14741/ijcet.v8i01.10878.
- [2] A. Azhari, S. Sulaiman, and A. K. P. Rao, “A review on the application of peening processes for surface treatment,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 114, p. 012002, Feb. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/114/1/012002.
- [3] U. C. Nwaogu and N. S. Tiedje, “Foundry Coating Technology: A Review,” *Materials Sciences and Applications*, vol. 2, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2011, doi: 10.4236/msa.2011.28155.
- [4] P. Scallan, “4 - Material evaluation and process selection,” in *Process Planning*, P. Scallan, Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, pp. 109–170. doi: 10.1016/B978-075065129-5/50005-2.
- [5] M. Bosse, K.-P. Hoyer, Fr.-W. Bach, and D. Bormann, “Influence of cutting and non-cutting processes on the corrosion behavior and the mechanical properties of magnesium alloys,” presented at the Magnesium Technology, Jan. 2008.
- [6] M. Srivastava, R. Tripathi, S. Hloch, S. Chattopadhyaya, and A. R. Dixit, “Potential of Using Water Jet Peening as a Surface Treatment Process for Welded Joints,” *Procedia Engineering*, vol. 149, pp. 472–480, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.694.
- [7] P. P. Shukla, P. T. Swanson, and C. J. Page, “Laser shock peening and mechanical shot peening processes applicable for the surface treatment of technical grade ceramics: A review,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 228, no. 5, pp. 639–652, May 2014, doi: 10.1177/0954405413507250.
- [8] H. Soyama, “Comparison between Shot Peening, Cavitation Peening, and Laser Peening by Observation of Crack Initiation and Crack Growth in Stainless Steel,” *Metals*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/met10010063.
- [9] Y. Prawoto, P. Mazein, A. Kosterin, and Z. Ahmad, “Effect of Shot Size in Surface Improvement via Shot Peening; Analytical, Modeling and Experimental Approaches,” *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*, vol. 4, no. 1, Jun. 2019, Accessed: Apr. 17, 2021. [Online]. Available: <https://www.vibgyorpublishers.org/content/ijmmp/fulltext.php?aid=ijmmp-4-033>
- [10] W. Zinn, J. Schulz, R. Kopp, and B. Scholtes, “The Influence of the Velocity of a Peening Medium on the Almen Intensities and Residual Stress States of Shot Peened Specimens,” Institute of Materials Technology & Institute of Metal Forming, Germany, 2002/2022, 2003. Accessed: Apr. 17, 2021. [Online]. Available: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2002022.pdf>
- [11] H. Miao, “Numerical and Theoretical Study of Shot Peening and Stress Peen Forming Process,” Jun. 2010.
- [12] S. Karuppanan, J. S. Romero, E. R. de los Rios, C. Rodopoulos, and A. Levers, “A Theoretical and Experimental Investigation into the Development of Coverage in Shot Peening,” in *Shot Peening*, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, pp. 101–107. doi: 10.1002/3527606580.ch14.
- [13] P. S. Prevey and J. T. Cammett, “The Effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress, Cold Work and Fatigue in a Ni-Cr-Mo Low Alloy Steel,” LAMBDA RESEARCH CINCINNATI OH, Sep. 2000. Accessed: Mar. 23, 2021. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA444574>

- [14] K. A. Soady, “Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening Part 1 – effect of shot peening on fatigue resistance,” *Materials Science and Technology*, vol. 29, no. 6, pp. 637–651, Jun. 2013, doi: 10.1179/1743284713Y.0000000222.
- [15] Κοζώρης Γεώργιος, “Ανάλυση και Τεκμηρίωση Δεδομένων για την Αντοχή σε Εφελκυσμό Δοκίμων Κατασκευασμένων από Υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene και Butadiene Styrene Plus σε Τρισδιάστατο Εκτυπωτή,” Τ.Ε.Ι. Κρήτης Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Κρήτη, 2014. Accessed: Mar. 23, 2021. [Online]. Available: <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/mhx/2014/KozorisGeorgios/attached-document-1421328810-904266-22447/KozorisGeorgios2014.pdf>
- [16] J. E. Spowart and H. E. Dève, “3.09 - Compressive Failure of Metal Matrix Composites,” in *Comprehensive Composite Materials*, A. Kelly and C. Zweben, Eds. Oxford: Pergamon, 2000, pp. 221–245. doi: 10.1016/B0-08-042993-9/00124-8.
- [17] J. Champaigne, “Shot Peening Overview,” *Shotpeener*, p. 37, Jan. 2001, Accessed: Mar. 24, 2021. [Online]. Available: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2001012.pdf>
- [18] Y. Kaynak and E. Tascioglu, “Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing,” *Prog Addit Manuf*, vol. 5, no. 2, pp. 221–234, Jun. 2020, doi: 10.1007/s40964-019-00099-1.
- [19] H. Marashi, A. A. D. Sarhan, I. Maher, and M. Sayuti, “1.7 Techniques to Improve EDM Capabilities: A Review,” in *Comprehensive Materials Finishing*, M. Hashmi, Ed. Oxford: Elsevier, 2017, pp. 171–202. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09153-0.
- [20] B. Bhattacharyya, “Chapter 2 - Electrochemical Machining: Macro to Micro,” in *Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology*, B. Bhattacharyya, Ed. William Andrew Publishing, 2015, pp. 25–52. doi: 10.1016/B978-0-323-32737-4.00002-5.
- [21] M. A. Elhameed, “Residual Stress Distribution Caused by Milling,” pp. 391–411, Dec. 2018.
- [22] J. Outeiro, “Residual Stresses in Machining Operations,” in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, The International Academy for Produ, L. Laperrière, and G. Reinhart, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, pp. 1–13. doi: 10.1007/978-3-642-35950-7\_16811-1.
- [23] Y. Qi, V. Nguyen, S. Melkote, and M. Varenberg, “Wear of WC inserts textured by shot peening and electrical discharge machining,” *Wear*, vol. 452–453, p. 203279, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203279.
- [24] M. Mhaede, F. Pastorek, and B. Hadzima, “Influence of shot peening on corrosion properties of biocompatible magnesium alloy AZ31 coated by dicalcium phosphate dihydrate (DCPD),” *Materials Science and Engineering: C*, vol. 39, pp. 330–335, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.msec.2014.03.023.
- [25] M. P. Nascimento, M. A. S. Torres, R. C. Souza, and H. J. C. Voorwald, “Effect of a Shot Peening Pre Treatment on the Fatigue Behaviour of Hard Chromium on Electroless Nickel Interlayer Coated AISI 4340 Aeronautical Steel,” *Materials Research*, vol. 5, no. 2, pp. 95–100, Jun. 2002, doi: 10.1590/S1516-14392002000200002.

- [26] R. Bag, A. Panda, A. Sahoo, and R. Kumar, “A Comprehensive Review on AISI 4340 Hardened Steel: Emphasis on Industry Implemented Machining Settings, Implications, and Statistical Analysis,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 12, Aug. 2020, doi: 10.30880/ijie.2020.12.08.007.
- [27] ENS Technology, “MIL-C-26074 E Electroless Nickel Plating,” *ENS Technology*. <https://www.enstechnology.com/mil-spec/mil-c-26074-e> (accessed Mar. 24, 2021).
- [28] A. Włodarczyk-Fligier, K. Labisz, M. Polok-Rubiniec, and J. Konieczny, “Application of Anodization Process for Cast Aluminium Surface Properties Enhancement,” *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 61, pp. 1005–1010, Sep. 2016, doi: 10.1515/amm-2016-0222.
- [29] J. Champaigne, “Shot Peening,” pp. 108–113, Feb. 2006, doi: 10.1002/3527606580.ch15.
- [30] S. A. David, S. S. Babu, and J. M. Vitek, “Welding,” in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, and P. Veyssi re, Eds. Oxford: Elsevier, 2003, pp. 1–9. doi: 10.1016/B0-08-043152-6/01889-1.
- [31] B. K. Sreedhar, S. K. Albert, and A. B. Pandit, “Cavitation damage: Theory and measurements – A review,” *Wear*, vol. 372–373, pp. 177–196, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.wear.2016.12.009.
- [32] T. C. Lindley, “Fretting Fatigue,” in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, and P. Veyssi re, Eds. Oxford: Elsevier, 2001, pp. 3347–3351. doi: 10.1016/B0-08-043152-6/00598-2.
- [33] W. H. Lee *et al.*, “Surface-Directed Molecular Assembly of Pentacene on Monolayer Graphene for High-Performance Organic Transistors,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 133, no. 12, pp. 4447–4454, Mar. 2011, doi: 10.1021/ja1097463.
- [34] P. Sanjurjo, C. Rodr guez, I. Pe uelas, T. E. Garc a, and F. J. Belzunce, “Influence of the target material constitutive model on the numerical simulation of a shot peening process,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 258, pp. 822–831, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.07.075.
- [35] L. Singh, R. Khan, and M. Aggarwal, “Effect of shot peening on hardening and surface roughness of nitrogen austenitic stainless steel,” *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, May 2010, Accessed: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/50273857\\_Effect\\_of\\_shot\\_peening\\_on\\_hardening\\_and\\_surface\\_roughness\\_of\\_nitrogen\\_austenitic\\_stainless\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/50273857_Effect_of_shot_peening_on_hardening_and_surface_roughness_of_nitrogen_austenitic_stainless_steel)
- [36] A. Laamouri, H. Sidhom, and C. Braham, “Evaluation of residual stress relaxation and its effect on fatigue strength of AISI 316L stainless steel ground surfaces: Experimental and numerical approaches,” *International Journal of Fatigue*, vol. 48, pp. 109–121, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2012.10.008.
- [37] J. O. ; P. H. B. Almen, *Residual Stresses And Fatigue In Metals*, NOTE: EX-LIBRARY COPY edition. McGraw-Hill Book Company, 1963.
- [38] C. A. Rodopoulos, S. A. Curtis, E. R. de los Rios, and J. SolisRomero, “Optimisation of the fatigue resistance of 2024-T351 aluminium alloys by controlled shot peening—methodology, results and analysis,” *International Journal of Fatigue*, vol. 26, no. 8, pp. 849–856, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2004.01.003.

- [39] G. A. Webster and A. N. Ezeilo, “Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes,” *International Journal of Fatigue*, vol. 23, pp. 375–383, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0142-1123(01)00133-5.
- [40] L. Raceanu, V. Optasanu, T. Montesin, G. Montay, and M. François, “Shot-Peening of Pre-Oxidized Plates of Zirconium: Influence of Residual Stress on Oxidation,” *Oxid Met*, vol. 79, no. 1, pp. 135–145, Feb. 2013, doi: 10.1007/s11085-012-9336-0.
- [41] T. Hong, J. Y. Ooi, and B. Shaw, “A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, no. 8, pp. 1097–1110, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.11.017.
- [42] M. Guagliano, “Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, no. 3, pp. 277–286, Apr. 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(00)00893-1.
- [43] Herzog, Zinn W, Scholtes B, and Wohlfahrt H, “The Significance of Almen Intensity for the Generation of Shot Peening Residual Stresses.,” *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 27, no. 12, pp. 608–617, 1996, Accessed: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=200902105745301396](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902105745301396)
- [44] D. Kirk, “Theoretical Principles of Shot Peening Coverage,” *The Shot Peener magazine*, vol. 19, no. 2, p. 3, 2005. Accessed: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.shotpeener.com/library/detail.php?anc=2005145>
- [45] M. Zimmermann, V. Schulze, H. Baron, and D. Loehe, “A Novel 3D Finite Element Simulation Model for the Prediction of the Residual Stress State after Shot Peening,” *undefined*, 2010, Accessed: Mar. 24, 2021. [Online]. Available: </paper/A-Novel-3D-Finite-Element-Simulation-Model-for-the-Zimmermann-Schulze/106a9d6577aeec30ad79ff08a3670aa1cb268f8>
- [46] V. Llana and F. J. Belzunce, “Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: roughness, residual stresses and work hardening,” *Applied Surface Science*, vol. 356, pp. 475–485, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.apsusc.2015.08.110.
- [47] S. Bagherifard, R. Ghelichi, and M. Guagliano, “Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening,” *Applied Surface Science*, vol. 258, no. 18, pp. 6831–6840, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.apsusc.2012.03.111.
- [48] Y. F. Al-Obaid, “A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metals by Shot-Peening,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 57, no. 2, pp. 307–312, Jun. 1990, doi: 10.1115/1.2891990.
- [49] M. Kobayashi, T. Matsui, and Y. Murakami, “Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening,” *International Journal of Fatigue*, vol. 20, no. 5, pp. 351–357, May 1998, doi: 10.1016/S0142-1123(98)00002-4.
- [50] K. Mori, K. Osakada, and N. Matsuoka, “Finite element analysis of peening process with plasticity deforming shot,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 607–612, Sep. 1994, doi: 10.1016/0924-0136(94)90406-5.
- [51] S. A. Meguid, G. Shagal, J. C. Stranart, and J. Daly, “Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 31, no. 3, pp. 179–191, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0168-874X(98)00057-2.

- [52] K. Schiffner and C. Droste gen. Helling, “Simulation of residual stresses by shot peening,” *Computers & Structures*, vol. 72, no. 1, pp. 329–340, Jul. 1999, doi: 10.1016/S0045-7949(99)00012-7.
- [53] J. Edberg, L.-E. Lindgren, and M. Ken-Ichiro, “Shot peening simulated by two different finite element formulations,” presented at the International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes : 18/06/1995 - 21/06/1995, 1995. Accessed: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-39905>
- [54] S. Al-Hassani, K. Kormi, and D. Webb, “Numerical Simulation of Multiple Shot Impact,” presented at the Conf Proc: ICSP-7 (pg 217-227), 1999. Accessed: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.shotpeener.com/library/detail.php?anc=1999033>
- [55] J. Schwarzer, V. Schulze, and O. Vöhringer, “Evaluation of the Influence of Shot Peening Parameters on Residual Stress Profiles Using Finite Element Simulation,” *Materials Science Forum*, vol. 426–432, pp. 3951–3956, 2003, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.3951.
- [56] E. Rouhaud, A. Ouakka, C. Ould, J. Chaboche, and M. Fran, “Finite Elements Model of Shot Peening, Effects of constitutive Laws of the Material,” 2007, Accessed: Mar. 21, 2021. [Online]. Available: </paper/FINITE-ELEMENTS-MODEL-OF-SHOT-PEENING-%2C-EFFECTS-OF-Rouhaud-Ouakka/498b913d37271ccff2a7063a0888137a8e91e269>
- [57] H. Guechichi, L. Castex, and M. Benkhattab, “An Analytical Model to Relate Shot Peening Almen Intensity to Shot Velocity,” *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 41, no. 1, pp. 79–99, Jan. 2013, doi: 10.1080/15397734.2012.703607.
- [58] Monroe, “What Is Sandblasting?,” *Monroe Engineering*, Sep. 27, 2019. <https://monroeengineering.com/blog/what-is-sandblasting/> (accessed May 18, 2021).
- [59] Swanton Welding Company, “Different Types of Abrasive (Sand) Blasting,” *Swanton Welding Company*, Apr. 14, 2016. <https://blog.swantonweld.com/different-types-of-sand-blasting> (accessed May 18, 2021).
- [60] Σφαιροβολή, “Σφαιροβολή,” *Sfairovoli.gr*, May 2021. <http://www.sfairovoli.gr/%CE%94%CE%AC%CF%80%CE%B5%CE%B4%CE%B1-%CE%94%CF%81%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CE%B9.htm> (accessed May 19, 2021).
- [61] Maycon, “Maycon Global,” *Maycon Structure of Road Safety*, 2016. <https://www.maycon.eu/gr/> (accessed May 19, 2021).
- [62] T. Oikonomou and A. Oikonomou, “Shotblasting.gr,” *Shotblasting.gr*, 2021. <http://www.shotblasting.gr/> (accessed May 19, 2021).
- [63] Vernicol, “Vernicol S.A. - Ιστορία,” *Vernicol S.A.*, May 2021. <https://www.vernicol.com/gr/profil-etaireias/istoria-etaireias> (accessed May 19, 2021).
- [64] Stelma, “Stelma T.S.A. Group of Companies,” *Stelma.gr*, May 2021. <https://www.stelma.gr/el/> (accessed May 20, 2021).
- [65] A. Χαρίστας, “Αμμοβολές | Αμμος & Χρώμα,” *sandblastings.gr*, May 2021. <https://www.sandblastings.gr/ammovoles> (accessed May 20, 2021).
- [66] Pytheas Group, “The Pytheas Group,” *Pytheas Group*, May 2021. <https://www.pytheasgroup.com/en/> (accessed May 20, 2021).

- [67] BalkanBlast, “BalkanBlast Industrial Solutions,” *BalkanBlast*, May 2021. <https://balkanblast.gr/> (accessed May 20, 2021).
- [68] E. J. Hearn, “Chapter 10 - Contact Stress, Residual Stress and Stress Concentrations,” in *Mechanics of Materials 2 (Third Edition)*, E. J. Hearn, Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997, pp. 381–442. doi: 10.1016/B978-075063266-9/50011-1.