

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ:
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Πτυχιακή Εργασία

Τίτλος Εργασίας: «Ανακύκλωση μετάλλων: Χάλυβα, αλουμινίου και χαλκού»

Φοιτητής	Μαθιουδάκης Φοίβος ΑΜ6653
Επιβλέπων	Σακκάς Νικόλαος, Καθηγητής Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Management

Μάϊος 2025

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία επιδιώκει να μελετήσει την ανακύκλωση μετάλλων, εστιάζοντας στον χάλυβα, στο αλουμίνιο, καθώς και στον χαλκό. Ειδικότερα, γίνεται λόγος γενικά για την ανακύκλωση μετάλλων, εστιάζοντας και στο θεσμικό πλαίσιο που την διέπει. Ακολούθως, η εργασία εξετάζει αναλυτικά την διαδικασία ανακύκλωσης χάλυβα, όπου παρουσιάζει τις υφιστάμενες πρακτικές, όπως επίσης και τις νέες τάσεις που προκύπτουν, ενώ αντίστοιχη προσέγγιση γίνεται και για το αλουμίνιο, καθώς και για τον χαλκό.

Από την εργασία αυτή προέκυψαν ενδιαφέρον συμπεράσματα. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι οι τεχνολογίες ανακύκλωση των μετάλλων έχουν αναπτυχθεί και συνεχίζουν να αναπτύσσονται διαρκώς, καθώς αυτές συνάδουν με την έννοια της κυκλικής οικονομίας που αναπτύσσεται παγκοσμίως, προάγοντας την βιωσιμότητα. Για την επιτυχή περαιτέρω διάδοση της ανακύκλωσης των μετάλλων, απαιτείται η κατάλληλη προσπάθεια από το σύνολο των εμπλεκόμενων φορέων, δηλαδή τόσο από τους ίδιους τους φορείς που παράγουν τα απόβλητα αυτά, όσο και από την ίδια την πολιτεία, η οποία διαμορφώνει το κατάλληλο πλαίσιο για την ανακύκλωση.

Για την μελέτη του θέματος, έγινε βιβλιογραφική αναζήτηση, σε επιστημονικά περιοδικά και αντίστοιχα συγγράμματα, τα οποία και επικεντρώνονται στο ζήτημα της ανακύκλωσης μετάλλων. Ακόμη, εξετάστηκαν σχετικές μελέτες, όπως επίσης και ηλεκτρονικές πηγές από το διαδίκτυο, έτσι ώστε η προσέγγιση του υπό μελέτη θέματος να είναι όσο το δυνατόν πιο επικαιροποιημένη και σύγχρονη.

Λέξεις Κλειδιά:. *Ανακύκλωση μετάλλων, Αλουμίνιο, Κυκλική Οικονομία, Χαλκός, Χάλυβας.*

ABSTRACT

This thesis seeks to study metal recycling, focusing on steel, aluminium and copper. In particular, it discusses metal recycling in general, focusing on the institutional framework governing it. Subsequently, the paper examines in detail the steel recycling process, where it presents the existing practices as well as the emerging trends, while a similar approach is taken for aluminium and copper.

Interesting conclusions have been drawn from this work. In particular, it was found that metal recycling technologies have developed and continue to grow, as they are in line with the concept of the circular economy that is developing worldwide, promoting sustainability. The successful further dissemination of metal recycling requires an appropriate effort from all stakeholders, i.e. both the producers of the waste themselves and the state itself, which is shaping the appropriate framework for recycling.

In order to study this issue, a literature search was carried out, in scientific journals and corresponding texts, which focus on the issue of metal recycling. Furthermore, relevant studies, as well as online sources from the internet were examined, so that the approach to the topic under study is as up-to-date and modern as possible.

Keywords: *Metal recycling, Aluminium, Circular economy, copper, Steel, Copper, Stainless Steel.*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 1
ABSTRACT 2
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ 6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ανακύκλωση μετάλλων 10
1.1 Εισαγωγή 10
1.2 Η έννοια της ανακύκλωσης 10
1.3 Ιστορική εξέλιξη της ανακύκλωσης στο πέρασμα του χρόνου 11
1.4 Η ανακύκλωση υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας και της βιωσιμότητας ... 13
1.5 Θεσμικό πλαίσιο ανακύκλωσης 14
1.6 Ανακύκλωση μετάλλων 15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ανακύκλωση χάλυβα 20
2.1 Εισαγωγή 20
2.2 Εννοιολογική προσέγγιση χαλύβων 20
2.3 Κατηγορίες και εφαρμογές χαλύβων 21
2.4 Ανακύκλωση χαλύβων 24
2.5 Νέες τάσεις στην ανακύκλωση χάλυβα 27
2.6 Άτυπος τομέας και ανακύκλωση χαλύβων 30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανακύκλωση αλουμινίου 33
3.1 Εισαγωγή 33
3.2 Παραγωγή αλουμινίου 33
3.3 Ιδιότητες αλουμινίου 36
3.4 Τύποι και εφαρμογές αλουμινίου 38
3.5 Απόβλητα παραγωγής αλουμινίου 40
3.6 Τεχνολογίες ανάκτησης για τον περιορισμό των αποβλήτων στην βιομηχανία αλουμινίου 43
3.7 Άλλες πρακτικές ανακύκλωσης αλουμινίου 46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανακύκλωση χαλκού 49
4.1 Εισαγωγή 49
4.2 Ο χαλκός 49

4.3 Ιδιότητες και κατηγορίες χαλκού 52
4.4 Ανακύκλωση χαλκού 55
4.5 Εφαρμογές ανακυκλώσιμων προϊόντων χαλκού 57
4.6 Σύγχρονες τάσεις και πρακτικές στην ανακύκλωση χαλκού 59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΓΟΡΑ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ & ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ 62
5.1 Εισαγωγή 62
5.2 Η Αγορά Ανακυκλωμένων Μετάλλων 62
5.2.1 Τιμές Ανακυκλωμένων Μετάλλων στην Ελλάδα 62
5.2.2 Τάσεις και Προκλήσεις στην Ευρωπαϊκή Αγορά 63
5.3 Τεχνολογίες Ανακύκλωσης Μετάλλων από
Οχήματα Τέλους Κύκλου Ζωής (ΟΤΚΖ) 64
5.3.1 Η Διαδικασία Ανακύκλωσης ΟΤΚΖ 64
5.3.2 Προκλήσεις στην Ανακύκλωση Χάλυβα από ΟΤΚΖ 65
5.3.3 Προηγμένες Τεχνικές Ανάκτησης και Σχεδιασμός 65
5.4 Ποσοτικά Στοιχεία και η Κατάσταση στην Ελλάδα και την Ευρώπη 66
5.4.1 Ποσοστά Ανακύκλωσης στην Ευρώπη 66
5.4.2 Η Ανακύκλωση Μετάλλων στην Ελλάδα 66
5.4.3 Η Σημασία της Ανακύκλωσης Μετάλλων για την Κυκλική Οικονομία 66
5.5 Συμπεράσματα Κεφαλαίου 67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 68
6.1 Εισαγωγή 68
6.2 Σύνοψη Κύριων Ευρημάτων 68
6.3 Γενικά Συμπεράσματα 70
6.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα (Ενδεικτικά) 71
6.5 Τελικές Παρατηρήσεις 71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 71

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Διαδικασία ανακύκλωσης 11
Σχήμα 2: Βασικά στάδια διαδικασίας ανακύκλωσης μετάλλων 17
Σχήμα 3: Ανοιχτός και κλειστός κύκλος ανακύκλωσης μετάλλων 18

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τυπική χημική σύσταση του βωξίτη στην περιοχή της Ελλάδος 33
Πίνακας 2: Πρότυπες ιδιότητες μεταλλουργικής αλουμίνας..... 34
Πίνακας 3: Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου 36

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

«Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σακκά Νικόλαο, Καθηγητής Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Management του Τμήματος Μηχανολογίας για την υποστήριξη που μου παρείχε κατά την διαδικασία εκπόνησης της εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ τους διδάσκοντες καθηγητές μου για τις γνώσεις και τα πολύτιμα οφέλη που μου παρείχαν συνολικά στις σπουδές μου, όπως και την οικογένεια μου, η οποία με υποστήριξε και στο συγκεκριμένο εγχείρημα».

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι να μελετήσει την ανακύκλωση των μετάλλων, εστιάζοντας στον χάλυβα, στο αλουμίνιο, όπως επίσης και στον χαλκό. Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια. Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο μελετάται η ανακύκλωση των μετάλλων, όπου αρχικά προσδιορίζεται εννοιολογικά η ανακύκλωση και παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη αυτής στο πέρασμα του χρόνου. Εν συνεχεία, διερευνάται η ανακύκλωση υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας και βιωσιμότητας, ενώ έμφαση δίνεται στο θεσμικό πλαίσιο που διέπει την ανακύκλωση. Τέλος, εξετάζεται η ανακύκλωση μετάλλων. Εν συνεχεία, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας μελετάται η ανακύκλωση χάλυβα, όπου σε πρώτη φάση γίνεται εννοιολογική προσέγγιση των χαλύβων, ενώ ακολούθως περιγράφονται οι κατηγορίες, καθώς και οι εφαρμογές χάλυβα. Ακόμη, μελετάται διεξοδικά η ανακύκλωση χαλύβων, όπως επίσης και οι νέες τάσεις που δημιουργούνται στην ανακύκλωση χαλύβων, ενώ επισημαίνεται και ο ρόλος που διαδραματίζει ο άτυπος τομέας στην ανακύκλωση χαλύβων.

Στο κεφάλαιο τρία εξετάζεται η ανακύκλωση αλουμινίου, όπου αρχικά γίνεται λόγος για την παραγωγή αλουμινίου, ενώ στη συνέχεια εξετάζονται οι ιδιότητες του αλουμινίου, καθώς επίσης και οι τύποι, αλλά και οι εφαρμογές του αλουμίνιου. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα απόβλητα παραγωγής αλουμινίου, όπως επίσης και στις τεχνολογίες ανάκτησης για τον περιορισμό των αποβλήτων στην βιομηχανία αλουμινίου, ενώ τέλος αναφέρονται άλλες πρακτικές που έχουν αναπτυχθεί και αφορούν την ανακύκλωση αλουμινίου. Το κεφάλαιο τέσσερα εξετάζει την ανακύκλωση του χαλκού. Αρχικά, προσδιορίζεται η έννοια του χαλκού, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι ιδιότητες, καθώς επίσης και οι κατηγορίες χαλκού. Έμφαση δίνεται στην ανακύκλωση του χαλκού, όπως και στις εφαρμογές ανακυκλώσιμων προϊόντων χαλκού. Περιγράφονται οι πλέον σύγχρονες τάσεις και πρακτικές που αφορούν την ανακύκλωση χαλκού. Στο πέμπτο κεφάλαιο, η ανάλυση επεκτείνεται εξετάζοντας την αγορά των ανακυκλωμένων μετάλλων, τις εξειδικευμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης από οχήματα τέλους κύκλου ζωής (ΟΤΚΖ), καθώς και τα ποσοτικά δεδομένα και το θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση, συνδέοντας την ανακύκλωση με την κυκλική οικονομία. Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο,

παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συνολική ανάλυση της εργασίας, καθώς και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή είναι βιβλιογραφική αναζήτηση, η οποία και πραγματοποιείται σε επιστημονικά περιοδικά, όπως επίσης και σε συγγράμματα. Για την αναζήτηση αυτών, χρησιμοποιήθηκαν βάσεις επιστημονικών δεδομένων όπως είναι το Google Scholar, μελετώντας διάφορες επιστημονικές δημοσιεύσεις. Το υλικό που αναζητήθηκε ήταν στην ελληνική, όσο και στην αγγλική γλώσσα, με τις λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν να είναι οι ακόλουθες: Ανακύκλωση μετάλλων, Αλουμίνιο, Κυκλική Οικονομία, Χαλκός, Χάλυβας.

Περαιτέρω, αναζητήθηκε υλικό σε διεθνές, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο σε σχετικές μελέτες που έχουν γίνει και αφορούν την ανακύκλωση των μετάλλων. Το θέμα αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών εξαιτίας της επιδίωξης για βιωσιμότητα, όπως επίσης και λόγω της ανάγκης μετάβασης προς την κυκλική οικονομία. Ταυτόχρονα, επιδιώχθηκε να αναζητηθούν και στατιστικά στοιχεία, τα οποία αφορούν την ανακύκλωση των μετάλλων συνολικά, όπως επίσης και την ανακύκλωση των επιμέρους ρευμάτων, προκειμένου να μπορεί να διαπιστωθεί στον βαθμό που αυτό είναι εφικτό η πραγματική κατάσταση που αφορά την ανακύκλωση των μεταλλικών υλικών. Για τα στατιστικά αυτά στοιχεία, υλικό αναζητήθηκε σε βάσεις δεδομένων όπως είναι το Our World in Data, καθώς και άλλες πιο εξειδικευμένες πλατφόρμες. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκε υλικό από το διαδίκτυο, έτσι ώστε η προσέγγιση του υπό μελέτη ζητήματος να είναι όσο το δυνατόν πιο επικαιροποιημένη και σύγχρονη. Η αναζήτηση των πληροφοριών αυτών έγινε σε αξιόπιστες ιστοσελίδες, σε ολόκληρο τον κόσμο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ανακύκλωση μετάλλων

1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η ανακύκλωση μετάλλων. Αρχικά, προσδιορίζεται η έννοια της ανακύκλωσης, καθώς επίσης και η ιστορική εξέλιξη αυτής στο πέρασμα του χρόνου. Περαιτέρω, μελετάται η ανακύκλωση στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας και της βιωσιμότητας, επικεντρώνοντας και στο θεσμικό πλαίσιο ανακύκλωσης, ενώ εκτεταμένη αναφορά γίνεται στην ανακύκλωση μετάλλων.

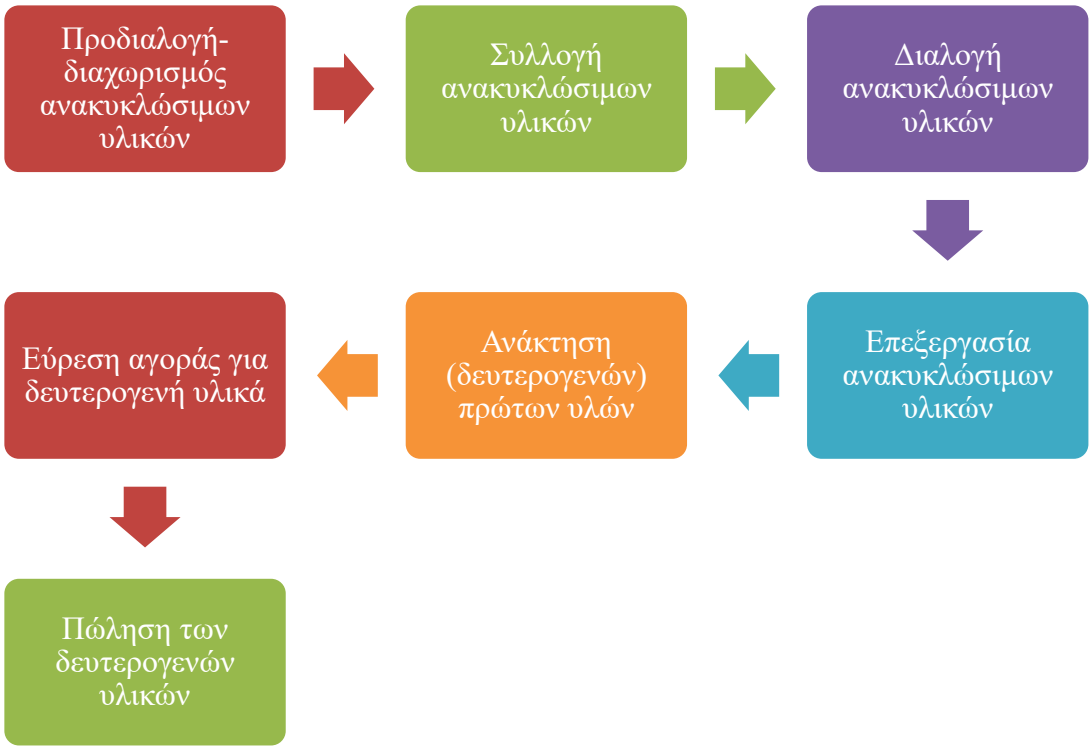
1.2 Η έννοια της ανακύκλωσης

Με την έννοια της ανακύκλωσης νοείται η διαδικασία ανάκτησης υλικού, μέσω της οποίας τα απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε νέα προϊόντα, υλικά, είτε ουσίες, οι οποίες και προορίζονται για την επιδίωξη και πάλι του σκοπού, είτε άλλων σκοπών, με εξαίρεση να αποτελεί η παραγωγή καύσιμης ύλης, όπως και οι εργασίες επίχωσης. Η διαδικασία της ανακύκλωσης παρουσιάζει διαφορετικό βαθμό ωριμότητας μεταξύ των διαφορετικών χωρών, αλλά ακόμη και μεταξύ των διαφορετικών δήμων και περιοχών (Waite,2013).

Η επιτυχία της διαδικασίας ανακύκλωσης συνδέεται με μια σειρά παραμέτρων, όπως είναι η κατάλληλη ενημέρωση των πολιτών, η συλλογή και μεταφορά των ανακυκλώσιμων υλικών στις μονάδες διαλογής και επεξεργασίας τους. Παράλληλα, παράγοντας επιτυχίας της διαδικασίας αυτής είναι η ανάκτηση πρώτων υλών και ενέργειας, όπως και η προώθηση των υλικών που ανακτώνται στην αγορά, προκειμένου να υπάρξει εκ νέου χρήση αυτών στην παραγωγική διαδικασία, είτε να υπάρξει κάλυψη συγκεκριμένων κοινωνικών αναγκών. Η ανακύκλωση μπορεί να γίνει μέσω εθελοντικών, είτε μέσω υποχρεωτικών προγραμμάτων, ενώ αντίστοιχα, οι πρωτοβουλίες που αναλαμβάνονται μπορεί να αφορούν τον δημόσιο, είτε τον ιδιωτικό τομέα (Sidique et al,2010).

Η διαδικασία της ανακύκλωσης μπορεί να γίνει μέσω μιας σειράς βημάτων-ενεργειών, τα οποία και παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί.

Σχήμα 1: Διαδικασία ανακύκλωσης



Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση των προγραμμάτων ανακύκλωσης λαμβάνεται υπόψη ο ρυθμός συλλογής, ο οποίος και δηλώνει το ποσοστό του βάρους ενός ανακυκλώσιμου υλικού στο συνολικό ρεύμα των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ), το οποίο και διαχωρίζεται πραγματικά προς ανακύκλωση. Ακόμη, χρησιμοποιείται ο δείκτης που αφορά τον ρυθμό συμμετοχής, ο οποίος κα εκφράζει το ποσοστό των παραγωγών ΑΣΑ, είτε πρόκειται για επιχειρήσεις, είτε για νοικοκυριά, οι οποίοι και συμμετέχουν σε κάποιο πρόγραμμα ανακύκλωσης. Σχετικά με τον ρυθμό ανακύκλωσης, εκφράζει την ποσότητα των ανακυκλώσιμων που συλλέγονται από νοικοκυριά στη μονάδα του χρόνου, ενώ ο ρυθμός εκτροπής αφορά το βάρος του συνόλου των Αστικών Στερεών Αποβλήτων, το οποίο δεν οδηγήθηκε στο ΧΥΤΑ, είτε σε αποτέφρωση (Suttibak & Nitivattananon,2008).

1.3 Ιστορική εξέλιξη της ανακύκλωσης στο πέρασμα του χρόνου

Είναι γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, όλο και περισσότερο αυξάνεται το ενδιαφέρον των κρατών, των πολιτών, αλλά και των επιχειρήσεων για την εφαρμογή πρακτικών ανακύκλωσης. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι πρόκειται για μια τάση που βαίνει αυξανόμενη, η ιδέα της ανακύκλωσης δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι κάτι νέο, καθώς απαντάται στο πέρασμα των αιώνων. Να σημειωθεί ότι υπάρχουν πηγές που αναφέρουν ότι η ανακύκλωση ως διαδικασία έχει ξεκινήσει από την εποχή του χαλκού, δηλαδή κατά τη διάρκεια των ετών 3000-1000π.Χ., χωρίς όμως να τεκμηριώνονται πλήρως οι αναφορές αυτές.

Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι σύμφωνα με αρχαιολογικές ανασκαφές, τα πρώτα απόβλητα στην αρχαία Ελλάδα, περίπου το 400 π.Χ. περιείχαν λιγότερο χρησιμοποιούμενα υλικά. Ουσιαστικά, πολλά από τα υλικά αυτά χρησιμοποιήθηκαν εκ νέου, έτσι ώστε να μπορέσουν να κατασκευαστούν χρήσιμα αντικείμενα για την τότε εποχή. Πολλά χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα το 1031, η Ιαπωνία ξεκίνησε πρώτη να επαναχρησιμοποιεί χαρτί, μέσω της διαδικασίας της ανακύκλωσης. Ακολούθως, έπειτα από πολλά χρόνια, το 1897, στη Νέα Υόρκη δημιουργήθηκε μια νέα εγκατάσταση ανάκτησης υλικών, στην οποία τα σκουπίδια ταξινομούνταν και διαχωρίζονταν σε επιμέρους κατηγορίες, όπως είναι το χαρτί, τα μέταλλα, τα υφάσματα, έτσι ώστε να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν.

Περαιτέρω, στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και ειδικότερα το 1904, δημιουργήθηκε το Σικάγο των ΗΠΑ το πρώτο εργοστάσιο ανακύκλωσης αλουμινίου. Μετά το πέρας του Β' Παγκοσμίου Πολέμου όλο και περισσότερα προϊόντα, όπως για παράδειγμα νάιλον, ελαστικά, καθώς και διάφορα άλλα απορρίμματα μετάλλων, πλέον ανακυκλώνονται τόσο στην Ευρώπη, όσο και στις ΗΠΑ. Το 1970 καθιερώθηκε σε παγκόσμιο επίπεδο το σύμβολο της ανακύκλωσης, το οποίο έγινε γνωστό ως "mobius strip", το οποίο και χρησιμοποιήθηκε και στα ανακυκλώσιμα υλικά. Εν συνεχεία, καθώς εξελίχθηκε ο κόσμος και δημιουργήθηκαν έντονες περιβαλλοντικές πιέσεις, η πρακτική της ανακύκλωσης επεκτάθηκε σημαντικά στις δυτικές χώρες και δόθηκε έμφαση και στη δημιουργία μιας νέας κουλτούρας-αντίληψης, όπου η ανακύκλωση θα βρίσκεται στο επίκεντρο.

1.4 Η ανακύκλωση υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας και της βιωσιμότητας

Αρχικά, θα πρέπει να γίνει αναφορά στην έννοια της κυκλικής οικονομίας, η οποία έρχεται να λειτουργήσει ως αντιστάθμισμα στις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις που απαντώνται για πόρους. Εφαρμόζοντας πρακτικές κυκλικής οικονομίας μπορεί να υπάρξει περιορισμός της σπατάλης των πόρων, ενώ συνάμα μπορεί να υπάρξει περαιτέρω προώθηση της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης προϊόντων (Uddin et al.,2023).

Υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας τα προϊόντα είναι αναγκαίο να διατηρούνται σε καλή λειτουργική κατάσταση για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ενώ έμφαση δίνεται στην χρήση των προϊόντων ως υπηρεσία και σημαντικότερη λιγότερη στην κατοχή των προϊόντων αυτών. Μέσω των διαφόρων πρακτικών κυκλικής οικονομίας μπορεί να περιοριστεί η σπατάλη των φυσικών πόρων, όπως επίσης και να υπάρξει περιορισμός της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, ενώ μπορεί να υπάρξει και αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Velenturf & Purnell,2021).

Η κυκλική οικονομία αποτελεί ένα νέο μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο και περιλαμβάνει την ανταλλαγή, εκμίσθωση, επαναχρησιμοποίηση, επισκευή, ανακαίνιση, όπως επίσης και ανακύκλωση υφιστάμενων υλικών και προϊόντων, σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό, προκειμένου να αυξηθεί ο κύκλος ζωής αυτών. Ουσιαστικά, μέσω των μονάδων διαλογής και επεξεργασίας υλικών μπορούν να προκύψουν δευτερογενή προϊόντα, τα οποία στη συνέχεια προωθούνται είτε άμεσα, είτε έμμεσα στην αγορά, συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων της κυκλικής οικονομίας που έχουν τεθεί. Ταυτόχρονα, επιδιώκεται να υπάρξει μεγιστοποίηση της αξίας και χρήσης των ανακυκλώσιμων υλικών, όπως επίσης και εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και μετριασμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Ragossnig & Schneider,2019).

Χρησιμοποιώντας την διαλογή στην πηγή, αυξάνονται οι δυνατότητες ανάκτησης των υλικών και συγκεκριμένα, τόσο των πρώτων υλών, όσο και της

ενέργειας. Παράλληλα, η διαλογή στην πηγή, όπως και η ανακύκλωση δημιουργούν σημαντικά οικονομικά οφέλη στην κοινωνία, όπως είναι οι νέες θέσεις εργασίας, καθώς επίσης και η συνολική βελτίωση της κοινωνικής ευημερίας. Τέλος, δεν θα πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι η ανακύκλωση μπορεί να προσφέρει σημαντικά στον πολιτισμό, καθώς ενδυναμώνει την περιβαλλοντική συνείδηση των εμπλεκόμενων μερών, αλλά και ευρύτερα του κοινωνικού συνόλου (Martinez Leal et al.,2020).

1.5 Θεσμικό πλαίσιο ανακύκλωσης

Το θεσμικό πλαίσιο για την ανακύκλωση μετάλλων στην Ελλάδα και την Ε.Ε. βασίζεται σε διάφορες νομοθεσίες και κανονισμούς που καθορίζουν τις διαδικασίες και τις απαιτήσεις για την ανακύκλωση, την επαναχρησιμοποίηση και τη διαχείριση αποβλήτων μετάλλων. Εδώ είναι οι κύριοι κανονισμοί (Κούγκολος & Εμμανουήλ,2024).

1. **Οδηγία 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα (Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα)**:
    - Καθορίζει τα πλαίσια για τη διαχείριση αποβλήτων σε όλη την Ε.Ε., περιλαμβάνοντας τη διαλογή, την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των υλικών.
    - Προβλέπει την προτεραιότητα στην αποφυγή παραγωγής αποβλήτων και τη μείωση της επικινδυνότητάς τους.
    - Προβλέπει την υποχρέωση των κρατών μελών για τη θέσπιση εθνικών στρατηγικών και προγραμμάτων για την ανακύκλωση.
2. **Οδηγία 2012/19/ΕΕ για τα απόβλητα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών (WEEE)**:
    - Στοχεύει στην ανακύκλωση των μετάλλων που περιέχονται σε ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά απόβλητα.
    - Ενσωματώνει απαιτήσεις για τη συλλογή, την επεξεργασία και την ανακύκλωση αυτών των αποβλήτων.
3. **Οδηγία 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απόβλητα συσκευασιών**:
    - Θέτει στόχους για την ανακύκλωση υλικών συσκευασίας, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, και καθορίζει τις διαδικασίες διαχείρισης των αποβλήτων συσκευασίας.

4. **Εθνική Νομοθεσία**:
    - Στην Ελλάδα, η ανακύκλωση μετάλλων και η διαχείριση των αποβλήτων μετάλλων καθορίζονται από τον Ν. 4042/2012 που ενσωματώνει την Οδηγία 2008/98/ΕΚ στην εθνική νομοθεσία.
    - Επιπλέον, υπάρχει ο Ν. 2939/2001 για τη διαχείριση των αποβλήτων και η Υπουργική Απόφαση 31788/2003, που προβλέπει τη δημιουργία συστημάτων συλλογής και ανακύκλωσης για διάφορους τύπους αποβλήτων.
5. **Στρατηγική ΕΕ για την Κυκλική Οικονομία**:
    - Στρατηγική της Ε.Ε. που προωθεί τη μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία, με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης πρώτων υλών και την ενίσχυση της ανακύκλωσης, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, μέσω της επαναχρησιμοποίησης υλικών και προϊόντων.

Αυτές οι νομοθεσίες θέτουν στόχους ανακύκλωσης, κανονισμούς για την ασφαλή διαχείριση και επεξεργασία των αποβλήτων μετάλλων και ορίζουν τις ευθύνες των επιχειρήσεων και των πολιτών για την ορθή ανακύκλωση και ανακύκλωση μετάλλων.

1.6 Ανακύκλωση μετάλλων

Πριν γίνει αναφορά στην ανακύκλωση μετάλλων, κρίνεται σκόπιμο να προσδιοριστεί η έννοια των μετάλλων, όπου πρόκειται για χημικά στοιχεία, τα οποία παρουσιάζουν ορισμένες κοινές ιδιότητες. Τα μέταλλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε σιδηρούχα και σε μη σιδηρούχα, με τα σιδηρούχα να αποτελούν συνδυασμό σιδήρου και άνθρακα, ενώ μπορεί να περιλαμβάνουν επίσης κράματα όπως είναι ο χάλυβας και ο χυτοσίδηρος. Στα μη σιδηρούχα μέταλλα περιλαμβάνονται το αλουμίνιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος, καθώς επίσης και ο κασσίτερος. Δεν θα πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι μια σημαντική κατηγορία των μη σιδηρούχων μετάλλων είναι τα πολύτιμα μέταλλα, όπως είναι ο χρυσός, ο λευκόχρυσος, ο άργυρος, το ασήμι, καθώς επίσης και το παλλάδιο (Sun et al.,2016).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα μέταλλα θεωρούνται πολύτιμα υλικά, καθώς υπάρχει δυνατότητα ανακύκλωσης αυτών και εκ νέου ανακύκλωσης, χωρίς να υπάρχει υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Μέσω της ανακύκλωσης αυτών μπορεί και επιτυγχάνεται μείωση των αποβλήτων τα οποία και κατευθύνονται στους χώρους υγειονομικής ταφής. Ταυτόχρονα, η ανακύκλωση των μετάλλων συμβάλλει στην διατήρηση των φυσικών πόρων, όπως είναι το νερό, τα ορυκτά, αλλά και το ξύλο, ενώ περιορίζεται και η κατανάλωση ενέργειας. Ακόμη, μέσω της ανακύκλωσης μετάλλων, επιτυγχάνονται λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αλλά ούτε και άλλες ουσίες που θεωρούνται επιβλαβείς για το περιβάλλον. Οι επιχειρήσεις που προβαίνουν στην ανακύκλωση μετάλλων καταφέρνουν και εξοικονομούν σημαντικά κόστη, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλουν στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας (Reck & Graedel,2012).

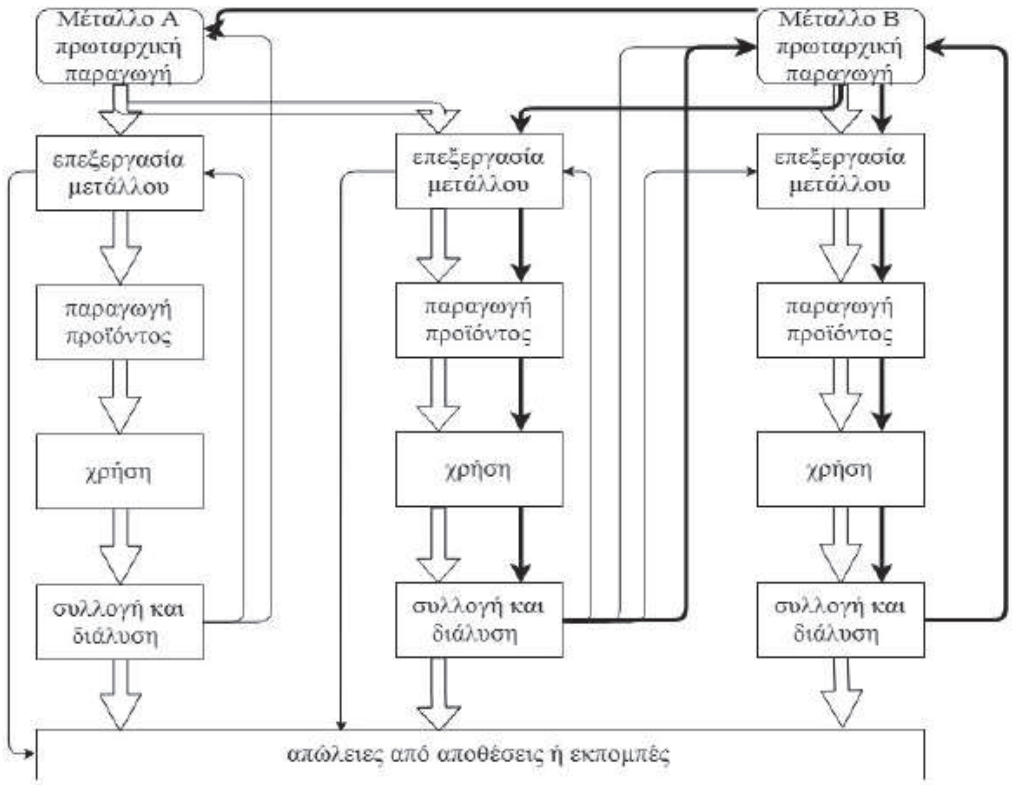
Η ανακύκλωση των μετάλλων μπορεί να χαρακτηριστεί από δύο τύπους συγκέντρωσης και ανακύκλωσης, με τον πρώτο να είναι ανοιχτού κύκλου, ενώ ο δεύτερος είναι κλειστού κύκλου. Προκειμένου να αποφεύγεται η απώλεια υλικού, κατά την διαδικασία της ανακύκλωσης είναι αναγκαίο να επιτυγχάνεται κλείσιμο του κύκλου. Κατά την διαδικασία ανοικτού κύκλου, το προϊόν έπειτα από τη συλλογή του, μεταβαίνει σε ένα διαφορετικό σύστημα παραγωγής και έτσι υπόκειται μεταβολές στα εγγενή χαρακτηριστικά του, χάνοντας τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής του. Αντιθέτως, η διαδικασία κλειστού κύκλου θεωρείται ότι συμβαίνει όταν ένα προϊόν εισέρχεται στο ίδιο σύστημα παραγωγής, έπειτα από το σύνολο των διαδικασιών που αφορούν την πρωταρχική παραγωγή, όπου συμπεριλαμβάνονται η εξόρυξη, η επεξεργασία, η παραγωγή του προϊόντος, η χρήση, η απόρριψη, η περισυλλογή, καθώς και η ανακύκλωση, παράγοντας το ίδιο αρχικό προϊόν, είτε όταν εισέρχεται σε ένα διαφορετικό σύστημα παραγωγής, διατηρώντας τις αρχικές ιδιότητές του, όπως επίσης και την ταυτότητά του (Ayres,1997).

Η διαδικασία της ανακύκλωσης μετάλλων λαμβάνει χώρα σε μια σειρά επιμέρους σταδίων, τα οποία και αποτυπώνονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2: Βασικά στάδια διαδικασίας ανακύκλωσης μετάλλων

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ανοιχτός και κλειστός κύκλος ανακύκλωσης μετάλλων.



Σχήμα 3: Ανοιχτός και κλειστός κύκλος ανακύκλωσης μετάλλων

Μια ακόμη διάκριση της ανακύκλωσης μετάλλων μπορεί να γίνει μεταξύ της τυπικής και της άτυπης ανακύκλωσης. Ειδικότερα, η τυπική ανακύκλωση, είναι αυτή που έχει θεσμοθετηθεί μέσω των κατάλληλων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Κατά την εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου ανακύκλωσης, τόσο τα στοιχεία, όσο και οι επιμέρους διαδικασίες που συντελούνται καταγράφονται λεπτομερώς, ενώ είναι διαθέσιμα στις αρχές, προκειμένου αυτές να τα επεξεργασθούν, διαμορφώνοντας τις πλέον κατάλληλες πολιτικές, αλλά και τεχνολογίες, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό ταχύτερους ρυθμούς ανακύκλωσης (Kashyap & Visvananthan,2014).

Από την άλλη, αναφορικά με την άτυπη ανακύκλωση, αυτή ουσιαστικά περιλαμβάνει την συγκέντρωση μετάλλων προς ανακύκλωση, τα οποία και προέρχονται από άγνωστες πτυχές, όπως επίσης χρησιμοποιώντας άγνωστες μεθόδους, καθώς και άγνωστες ποσότητες, χωρίς η συμπεριφορά και οι ενέργειες αυτώ να ρυθμίζονται από κάποιο θεσμικό πλαίσιο. Η συγκεκριμένη διαδικασία ανακύκλωσης συνοδεύεται από την απουσία των κατάλληλων δεδομένων, καθώς και

από προβληματική παρακολούθηση της πραγματικής κατάστασης, ενώ προβλήματα δημιουργούνται και σε επίπεδα σχεδιασμού και πολιτικών διαδικασιών (Nawaz et al.,2021).

Παγκοσμίως, η γενική οργανωτική δομή της διαδικασίας ανακύκλωσης αποτελείται από επίπεδα, στα οποία καθώς πηγαίνει κάποιος από το κατώτερο προς το ανώτερο αυξάνεται και ο όγκος της ροής των μετάλλων, καταλήγοντας στα χυτήρια, όπου εκεί δημιουργείται πρώτη ύλη για την παραγωγή νέων προϊόντων μετάλλου. Στην βάση της άτυπης δομής ανακύκλωσης βρίσκονται άτομα και μονάδες, τα οποία συλλέγουν και εν συνεχεία πωλούν τα αντικείμενα αυτά στις αμέσως επόμενες βαθμίδες. Ουσιαστικά, η επόμενη βαθμίδα μπορεί να αφορά άλλα άτομα τα οποία συγκεντρώνουν μεγαλύτερες ποσότητες μετάλλων και επιχειρούν να προβούν σε μια πρώτη επεξεργασία αυτών, ενώ η αμέσως επόμενη βαθμίδα περιλαμβάνει μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις. Περαιτέρω, στην επόμενη βαθμίδα υπάγονται βιοτεχνίες, όπως επίσης και άλλοι μεσάζοντες που λειτουργούν εκ μέρους μεγαλύτερων δομών-επιχειρήσεων, ενώ ακολουθούν οι χοντρέμποροι και στο τέλος τοποθετούνται οι ίδιες οι βιομηχανίες, οι οποίες και επεξεργάζονται τα μέταλλα αυτά, δημιουργώντας νέες χρήσεις (Ezeah et al.,2013).

Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει στις κατώτερες βαθμίδες, που αποτελούν και τη βάση της πυραμίδας, καθώς αυτές διαθέτουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Πιο αναλυτικά, αποτελούνται από τους παλιατζήδες, οι οποίοι κάνοντας χρήση διαφόρων μεταφορικών μέσων περιφέρονται εντός αστικού, αλλά και περιαστικού ιστού, συλλέγοντας αντικείμενα τα οποία βρίσκονται σε σπίτια, πεζοδρόμια, αυλές, αποθήκες, είτε ακόμη και αντικείμενα τα οποία έχουν τοποθετηθεί στους κάδους για απόρριψη. Τα αντικείμενα αυτά μεταφέρονται σε μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις προκειμένου να πωληθούν και να μπορέσουν να διατεθούν στην αγορά. Ακόμη, υπάρχουν οι συλλέκτες κάδων απορριμμάτων, οι οποίοι μετακινούνται εντός του αστικού ιστού συλλέγοντας αντικείμενα από μέταλλα που βρίσκονται μέσα στους κάδους, τόσο αυτούς που περιλαμβάνουν σύμμικτα απορρίμματα, όσο και από τους κάδους που περιλαμβάνουν το αντίστοιχο ρεύμα ανακύκλωσης. Στη συνέχεια αυτοί διαθέτουν τα προϊόντα αυτά σε μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στην ανακύκλωση μετάλλων (Suthar et al.,2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ανακύκλωση χάλυβα

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η ανακύκλωση χάλυβα, όπου αρχικά προσδιορίζονται εννοιολογικά οι χάλυβες και στη συνέχεια παρατίθενται οι πλέον σημαντικές κατηγορίες και εφαρμογές χαλύβων. Στη συνέχεια γίνεται λόγος για την ανακύκλωση χαλύβων, ενώ αναφέρονται και οι νέες τάσεις που αφορούν την ανακύκλωση χαλύβων, όπως και ο ρόλος που μπορεί να διαδραματίσει ο άτυπος τομέας στην ανακύκλωση χαλύβων.

2.2 Εννοιολογική προσέγγιση χαλύβων

Ο χάλυβας, ο οποίος είναι ευρέως γνωστός ως ατσάλι, περιλαμβάνει μια ευρεία κατηγορία υλικών, τα οποία ξεπερνούν τις 3.500 παραλλαγές. Οι χάλυβες μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες και συνδέονται με την ποσότητα άνθρακα που περιέχουν. Εφόσον, η συγκέντρωση αυτή είναι μικρότερη από 0,25% θεωρούνται μαλακοί χάλυβες, ενώ όταν η συγκέντρωση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 0,25-0,45% τότε θεωρούνται μέσης περιεκτικότητας. Τέλος, υπάρχουν οι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας, η συγκέντρωση των οποίων ξεπερνά το 0,45% και φθάνει έως και 1,5%. Είναι αρκετά σύνηθες, προκειμένου να υπάρξει ενίσχυση των ιδιοτήτων τους να γίνεται προσθήκη νικελίου, χρωμίου, όπως επίσης και μολυβδαινίου. Ωστόσο, να σημειωθεί ότι τα μέταλλα που ανήκουν στην κατηγορία των ανοξείδωτων χαλύβων, δεν περιλαμβάνονται στην κατηγορία των σιδηρούχων μετάλλων, παρά το γεγονός ότι περιέχουν 70% σίδηρο, αλλά λόγω της ύπαρξης νικελίου, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 8%, έχουν υψηλότερη αξία από τον κοινό χάλυβα, ενώ συνάμα δεν έχουν μαγνητικές ιδιότητες (Krauss,2015).

2.3 Κατηγορίες και εφαρμογές χαλύβων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο χάλυβας αποτελεί από τα πλέον σημαντικά υλικά στον κόσμο, έχοντας ευρεία εφαρμογή στον κλάδο της βιομηχανίας. Ανάλογα με

τη σύστασή του, ο χάλυβας μπορεί να διακριθεί σε διάφορες κατηγορίες, οι οποίες προσδιορίζουν τόσο τις ιδιότητες, όσο και τις εφαρμογές του. Οι χάλυβες είναι ένα από τα πιο χρήσιμα και ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά στη βιομηχανία, με μεγάλη ποικιλία τύπων που εξυπηρετούν διαφορετικές εφαρμογές και απαιτήσεις. Ο χάλυβας αποτελεί ένα κράμα σιδήρου, έχοντας μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ μπορεί να περιέχει και άλλα στοιχεία, προκειμένου να βελτιώσεις τις μηχανικές του ιδιότητες. Ανάλογα με τη σύνθεσή τους και τις προσθήκες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγής, οι χάλυβες μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους κατηγορίες, με την κάθε κατηγορία να διαθέτει μοναδικές ιδιότητες, οι οποίες και θεωρούνται κατάλληλες για συγκεκριμένες χρήσεις.

Ειδικότερα, η πρώτη κατηγορία χαλύβων είναι οι χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι οποίοι και περιέχουν λιγότερο από 0,3% άνθρακα, ενώ θεωρείται ότι είναι ιδιαίτερα εύκολοι στην επεξεργασία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα καθιστά τον συγκεκριμένο τύπο χάλυβα περισσότερο εύπλαστο και περισσότερο ανθεκτικό σε πιθανό σπάσιμο ή ρωγμές, κατά την επεξεργασία αυτού. Ο συγκεκριμένος τύπος χάλυβα χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία προϊόντων που απαιτούν καλή συγκολλησιμότητα και μηχανική κατεργασία, όπως για παράδειγμα είναι οι σωλήνες, τα δομικά υλικά, καθώς και τα κατασκευαστικά στοιχεία, τα οποία και δεν απαιτούν υπερβολική αντοχή στη φθορά, είτε στη θερμότητα.

Από την άλλη, οι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα περιέχουν πάνω από 0,6% άνθρακα και είναι περισσότερο σκληροί και ανθεκτικοί. Η συγκεκριμένη κατηγορία χαλύβων έχει υψηλότερη σκληρότητα και δύναμη, αλλά θεωρούνται περισσότερο εύπλαστοι και επομένως μπορούν να σπάσουν περισσότερο εύκολα, υπό συνθήκες έντονες πίεσης. Οι χάλυβες που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στη δημιουργία εργαλείων, κοπτικών και εξαρτημάτων, τα οποία απαιτούν υψηλή ανθεκτικότητα στη φθορά, όπως για παράδειγμα είναι οι λεπίδες, τα εργαλεία χειροτεχνίας, καθώς και άλλες εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη αντοχή.

Στην κατηγορία των χαλύβων κράματος (alloy steels) περιλαμβάνονται οι χάλυβες που έχουν προσθήκες άλλων μετάλλων, εκτός από τον άνθρακα, όπως είναι το

χρώμιο, το νικέλιο, το μολυβδαίνιο κτλ. Οι εν λόγω προσθήκες συμβάλλουν στην βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα, όπως είναι η ανθεκτικότητα στη διάβρωση, η αντοχή στη θερμότητα, καθώς και η καλύτερη απόδοση που επιτυγχάνεται υπό συνθήκες φορτίου. Κατά κύριο λόγο, οι χάλυβες κράματος χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπως είναι οι κινητήρες, τα εργαλεία, τα εξαρτήματα αυτοκινήτων, οι σκελετοί αεροπλάνων, όπως και οι χημικές εφαρμογές, όπου η αντίσταση στη διάβρωση, καθώς επίσης και η θερμική σταθερότητα είναι κρίσιμες.

Ένας άλλος τύπος χάλυβα είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο οποίος περιέχει τουλάχιστον χρώμιο σε ποσοστό περίπου 10,5%, το οποίο και προσδίδει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και την οξείδωση, ακόμη και σε εξαιρετικά σκληρές συνθήκες. Η αντιδιαβρωτική του ιδιότητα καθιστά τον ανοξείδωτο χάλυβα ιδανικό για εφαρμογές σε περιβάλλοντα τα οποία έχουν νερό, είτε χημικά, είτε άλλες διαβρωτικές ουσίες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο είδος χάλυβα χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στην βιομηχανία τροφίμων, στην ιατρική, όπως επίσης και για την κατασκευή συσκευών και εργαλείων, τα οποία έρχονται σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα. Ακόμη, χρησιμοποιείται στη ναυπηγική βιομηχανία για τη δημιουργία μέρους των κατασκευών, οι οποίες και εκτίθενται σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Περαιτέρω, στην κατηγορία των χαλύβων υψηλών αντοχών (high-strength steels), περιλαμβάνονται οι χάλυβες που είναι σχεδιασμένοι, προκειμένου να αντέχουν ιδιαίτερα υψηλές καταπονήσεις, όπως επίσης και σκληρές συνθήκες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι χάλυβες αυτοί περιέχουν πρόσθετα στοιχεία, όπως για παράδειγμα είναι το χρώμιο, το νικέλιο, καθώς και το μολυβδαίνιο, τα οποία και ενισχύουν τη δύναμη τους. Το συγκεκριμένο είδος χαλύβων χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στις κατασκευές γεφυρών, όπως επίσης και σε εξαρτήματα για τη βιομηχανία αυτοκινήτων, αλλά και σε διάφορες στρατιωτικές εφαρμογές, όπου θα πρέπει να υπάρχει υλικό το οποίο αντέχει σε έντονη καταπόνηση, υπό ακραίες συνθήκες.

Ιδιαίτερη μνεία θα πρέπει να γίνει στους χάλυβες που διαθέτουν ειδικά χαρακτηριστικά (special steels), όπου πρόκειται για τους χάλυβες οι οποίοι βρίσκουν πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, τέτοιοι χάλυβες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων, όπως επίσης και για την κατασκευή χαλύβων που έχουν σχεδιαστεί προκειμένου να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι χάλυβες αυτοί

υπόκειται σε επεξεργασία με συγκεκριμένους τρόπους ενώ χρησιμοποιούνται σε κλάδους της βιομηχανίας που απαιτούνται ιδιαίτερες ιδιότητες, όπως είναι για παράδειγμα η αεροναυπηγική, η κατασκευή εξοπλισμού ακριβείας, όπως επίσης και άλλες εξειδικευμένες τεχνολογίες.

Τέλος, μια ακόμη κατηγορία χαλύβων είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται στον τομέα των κατασκευών ή δομικοί χάλυβες, οι οποίοι και σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται στις κατασκευές και να παρέχουν την κατάλληλη στήριξη και αντοχή, η οποία απαιτείται για κτίρια, γέφυρες, πύργους, καθώς και άλλες δομές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι χάλυβες αυτοί έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα και δύναται να περιέχουν στοιχεία, όπως είναι το χρώμιο, αλλά και το μολυβδαίνιο, καθώς μέσω αυτών μπορεί να υπάρξει ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους. Να σημειωθεί ότι οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται σε ελαφριές και βαριές κατασκευές, όπου οι απαιτήσεις για μηχανική αντοχή είναι υψηλές.

Εν κατακλείδι, ο χάλυβας, ως υλικό θεωρείται ευέλικτος, αλλά και προσαρμόσιμος, με την κάθε κατηγορία αυτού να χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπου ουσιαστικά ανταγωνίζεται άλλα υλικά για την κατασκευή προϊόντων υψηλής ποιότητας σε πλήθος βιομηχανιών. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η σωστή επιλογή του τύπου χάλυβα είναι κρίσιμη για την απόδοση του τελικού προϊόντος, όπως επίσης και για την αντοχή του σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.

2.4 Ανακύκλωση χαλύβων

Η ανακύκλωση του χάλυβα αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς της κυκλικής οικονομίας, διαδραματίζοντας σημαίνοντα ρόλο στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της βιομηχανίας, όπως επίσης και στην εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας. Ο χάλυβας είναι ένα από τα πιο ανακυκλώσιμα υλικά, ενώ η διαδικασία της ανακύκλωσής του είχε πολλές εφαρμογές, καθώς και πλεονεκτήματα για το περιβάλλον, την οικονομία, καθώς και την κοινωνία. Παρά το γεγονός ότι ο χάλυβας αποτελεί από τα πλέον χρησιμοποιούμενα υλικά στον κόσμο, η διαδικασία παραγωγής του από πρώτες ύλες είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα και ταυτόχρονα

ρυπογόνα. Συνεπώς, η διαδικασία της ανακύκλωσης μπορεί και περιορίζει σημαντικά τις αρνητικές αυτές επιπτώσεις, γεγονός που καθιστά τον πόρο αυτό βιώσιμο.

Η διαδικασία ανακύκλωσης του χάλυβα εκκινεί με τη συλλογή των χρησιμοποιημένων προϊόντων από χάλυβα, με τα προϊόντα αυτά να προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως είναι για παράδειγμα τα οχήματα που έχουν αποσυρθεί, από παλαιά κτίρια, από βιομηχανικά και κατασκευαστικά απόβλητα, όπως και από ηλεκτρικές συσκευές. Αφού γίνει συλλογή των υλικών αυτών, θα πρέπει να υποβληθούν σε διαδικασία διαλογής, προκειμένου να υπάρξει διαχωρισμός των μετάλλων από άλλα υλικά, όπως είναι το πλαστικό και το γυαλί. Ο διαχωρισμός είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στάδια της ανακύκλωσης, καθώς εξασφαλίζει την καθαρότητα του χάλυβα που θα ανακυκλωθεί, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει την ανάγκη για τη διάθεση μη ανακυκλώσιμων αποβλήτων.

Έπειτα από τον διαχωρισμό, το υλικό που περιέχει χάλυβα μεταφέρεται σε μονάδες ανακύκλωσης, όπου τοποθετείται σε ειδικούς κλιβάνους τήξης. Η τήξη είναι η διαδικασία κατά την οποία το υλικό του χάλυβα λιώνει σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως πέριξ των 1.600^{o}C, ώστε να αφαιρεθούν οι ακαθαρσίες και να παραχθεί καθαρός χάλυβας. Η διαδικασία αυτή απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας, με την ενέργεια που καταναλώνεται στην ανακύκλωση του χάλυβα να είναι πολύ λιγότερη από αυτή που απαιτείται για την παραγωγή χάλυβα από πρώτες ύλες, όπως είναι τα σιδηρομετατελλεύματα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανακύκλωση ενός τόνου χάλυβα δύναται να εξοικονομήσει έως και 1,5 τόνο σιδηρομεταλλεύματος, καθώς και 600 κιλά άνθρακα, με αποτέλεσμα η διαδικασία της ανακύκλωσης να καθίσταται ιδιαίτερα αποδοτική και συνάμα φιλική προς το περιβάλλον.

Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο χάλυβας μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να χάνει τις φυσικές του ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι ο ανακυκλωμένος χάλυβας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά και ξανά για την παραγωγή νέων προϊόντων, όπως είναι για παράδειγμα τα οικοδομικά υλικά, τα εξαρτήματα αυτοκινήτων, τα εργαλεία και πολλές άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Ταυτόχρονα, η ιδιότητα αυτή του χάλυβα τον καθιστά ιδιαίτερα σημαντικό για τη βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας, συνεκτιμώντας ότι περιορίζεται η ανάγκη για εξόρυξη νέων πρώτων υλών, ενώ περιορίζεται η δημιουργία αποβλήτων.

Ο χάλυβας ανακυκλώνεται σε πολλές βιομηχανίες και εφαρμογές. Ένα από τα κύρια πεδία ανακύκλωσης είναι η αυτοκινητοβιομηχανία**,** όπου τα παλιά αυτοκίνητα, τα οποία περιέχουν σημαντική ποσότητα χάλυβα, ανακυκλώνονται για την παραγωγή νέων εξαρτημάτων, όπως πλαίσια, σασί και άλλα μέρη του αυτοκινήτου. Η ανακύκλωση των αυτοκινήτων συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και στην εξοικονόμηση υλικών για τη βιομηχανία, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τη ρύπανση και τις εκπομπές CO_2 που συνδέονται με την παραγωγή νέων προϊόντων από πρώτες ύλες. Επίσης, τα αυτοκίνητα που ανακυκλώνονται συνήθως περιλαμβάνουν και άλλα μέταλλα όπως το αλουμίνιο και το μολυβδαίνιο, τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε άλλες βιομηχανίες.

Η ανακύκλωση του χάλυβα είναι επίσης κρίσιμη για την κατασκευαστική βιομηχανία. Χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένο χάλυβα στην παραγωγή σιδήρου και άλλων δομικών υλικών, οι κατασκευαστές μειώνουν την ανάγκη για εξόρυξη και επεξεργασία νέων υλικών, μειώνοντας τις επιπτώσεις στη φύση και την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή. Ο ανακυκλωμένος χάλυβας χρησιμοποιείται για την κατασκευή σωλήνων, τσιμέντου, γέφυρες και άλλα δομικά υλικά, βοηθώντας στην ανάπτυξη υποδομών και στη μείωση των εκπομπών CO_2 από τη βιομηχανία.

Επιπλέον, η ανακύκλωση του χάλυβα έχει θετικό αντίκτυπο στη βιομηχανία εργαλείων και εξαρτημάτων. Ο ανακυκλωμένος χάλυβας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή εργαλείων, μηχανημάτων και εξαρτημάτων για άλλες βιομηχανίες. Τα εργαλεία και τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από ανακυκλωμένο χάλυβα είναι εξίσου ανθεκτικά με τα προϊόντα που παράγονται από πρώτες ύλες, γεγονός που αυξάνει την αποτελεσματικότητα και την οικονομία των βιομηχανιών.

Η ενέργεια που εξοικονομείται κατά την ανακύκλωση του χάλυβα είναι μια από τις πιο σημαντικές πτυχές της διαδικασίας. Η παραγωγή χάλυβα από ανακυκλωμένα υλικά απαιτεί 75% λιγότερη ενέργεια σε σχέση με την παραγωγή χάλυβα από σιδηρομετάλλευμα. Επίσης, η διαδικασία ανακύκλωσης δημιουργεί λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου, καθώς η ενέργεια που απαιτείται για την ανακύκλωση είναι πολύ

λιγότερη από αυτή που απαιτεί η παραγωγή νέου χάλυβα. Όλες αυτές οι μειώσεις στις εκπομπές CO_2 είναι κρίσιμες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

Η βιομηχανία ανακύκλωσης χάλυβα συμβάλλει στην κυκλική οικονομία, καθώς ενσωματώνει τις διαδικασίες επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης για τη μείωση των αποβλήτων και τη διατήρηση των πόρων στον οικονομικό κύκλο. Αντί να καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή να επεξεργάζονται σε λιγότερο αποδοτικούς τομείς, τα ανακυκλωμένα υλικά επιστρέφουν στην παραγωγή, μειώνοντας την ανάγκη για νέα εξόρυξη και μειώνοντας τα περιβαλλοντικά αποτυπώματα.

Η ανακύκλωση του χάλυβα έχει επίσης θετικό αντίκτυπο στην οικονομία. Η χρήση ανακυκλωμένων υλικών οδηγεί σε μείωση του κόστους παραγωγής, καθώς οι πρώτες ύλες είναι πιο φθηνές και λιγότερο ενεργοβόρες. Επιπλέον, η διαδικασία της ανακύκλωσης δημιουργεί θέσεις εργασίας στον τομέα της επεξεργασίας και της ανακύκλωσης των αποβλήτων, ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη της οικονομίας.

Συνολικά, η ανακύκλωση του χάλυβα είναι μια στρατηγική που προσφέρει σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία. Η μειωμένη ανάγκη για εξόρυξη, η εξοικονόμηση ενέργειας, η μείωση των αποβλήτων και η ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας αποτελούν μερικούς από τους λόγους για τους οποίους η ανακύκλωση του χάλυβα είναι απαραίτητη για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Μέσω αυτής της διαδικασίας, μπορούμε να μειώσουμε τις αρνητικές επιπτώσεις της βιομηχανίας και να δημιουργήσουμε μια πιο βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική κοινωνία.

2.5 Νέες τάσεις στην ανακύκλωση χάλυβα

Η ανακύκλωση του χάλυβα είναι μια διαδικασία που εξελίσσεται συνεχώς, καθώς η ανάγκη για πιο βιώσιμες και αποδοτικές πρακτικές γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική. Η βιομηχανία του χάλυβα αντιμετωπίζει νέες προκλήσεις και απαιτήσεις σε επίπεδο περιβαλλοντικών κανονισμών και βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, κάτι που οδηγεί σε καινοτόμες λύσεις και νέες τάσεις στην ανακύκλωση του υλικού. Αυτές οι τάσεις έχουν ως στόχο να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της

βιομηχανίας, να εξοικονομήσουν πόρους και να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα της ανακύκλωσης χαλύβων.

Μία από τις πιο σημαντικές νέες τάσεις στην ανακύκλωση του χάλυβα είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της διαδικασίας ανακύκλωσης**.** Η παραδοσιακή ανακύκλωση του χάλυβα απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας για την τήξη του υλικού σε ειδικούς κλιβάνους. Ωστόσο, νέες τεχνολογίες στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται σε αυτή τη διαδικασία, ενσωματώνοντας, για παράδειγμα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στις μονάδες ανακύκλωσης. Η χρήση ηλιακής και αιολικής ενέργειας για τη λειτουργία των εργοστασίων ανακύκλωσης του χάλυβα θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές CO_2 που σχετίζονται με τη διαδικασία παραγωγής. Αυτές οι τεχνολογίες είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο, αλλά δείχνουν μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για την ενσωμάτωση της ανακύκλωσης στον τομέα της κυκλικής οικονομίας.

Ένα ακόμα σημαντικό βήμα που διαμορφώνει τις νέες τάσεις στην ανακύκλωση του χάλυβα είναι η βελτίωση της ποιότητας του ανακυκλωμένου υλικού. Όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του ανακυκλωμένου χάλυβα, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής του σε πιο απαιτητικές εφαρμογές. Για να επιτευχθεί αυτό, υπάρχουν νέες μέθοδοι για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών και των άλλων μετάλλων που μπορεί να υπάρχουν στο ανακυκλωμένο υλικό. Η χρήση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών διαλογής και διαχωρισμού, όπως η μαγνητική διαλογή και η τεχνολογία φθορισμού**,** επιτρέπει τον ακριβή διαχωρισμό του χάλυβα από άλλα μέταλλα ή ακαθαρσίες, εξασφαλίζοντας ότι το τελικό ανακυκλωμένο υλικό είναι καθαρό και έτοιμο για επαναχρησιμοποίηση σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

Επιπλέον, η ψηφιοποίηση και η χρήση τεχνολογιών πληροφορικής είναι μια ακόμη σημαντική τάση που κερδίζει έδαφος στον τομέα της ανακύκλωσης του χάλυβα. Η παρακολούθηση της διαδικασίας ανακύκλωσης μέσω συστήματος Internet of Things (IoT) και τεχνολογιών Big Data επιτρέπει την ακριβή παρακολούθηση των αποβλήτων, της ποιότητας του ανακυκλωμένου υλικού και της ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει στους υπεύθυνους της ανακύκλωσης να βελτιώσουν τις διαδικασίες, να μειώσουν τα απόβλητα και να εξοικονομήσουν ενέργεια, βελτιώνοντας την απόδοση της παραγωγής.

Μια ακόμη τάση που αναδεικνύεται είναι η ανάπτυξη νέων υλικών και κραμάτων χάλυβα με καλύτερη ανακυκλωσιμότητα. Καθώς οι ανάγκες των βιομηχανιών συνεχώς εξελίσσονται, οι νέες συνθέσεις και κράματα χάλυβα αναπτύσσονται για να προσφέρουν καλύτερη απόδοση σε εφαρμογές που απαιτούν ανθεκτικότητα και απόδοση υπό ακραίες συνθήκες. Αυτά τα νέα κράματα σχεδιάζονται ώστε να είναι πιο φιλικά προς τη διαδικασία ανακύκλωσης, περιορίζοντας την παραγωγή αποβλήτων και εξασφαλίζοντας ότι μπορούν να ανακυκλωθούν πλήρως χωρίς να χάσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Η εξαγωγή και επαναχρησιμοποίηση πολύτιμων μετάλλων από το χάλυβα είναι επίσης μια ανερχόμενη τάση στην ανακύκλωση του χάλυβα. Στη διαδικασία παραγωγής χαλύβων, πέρα από το βασικό υλικό, συχνά υπάρχουν πολύτιμα μέταλλα, όπως το χρώμιο, το νικέλιο και το μολυβδαίνιο, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των ιδιοτήτων του χάλυβα. Η ανάκτηση αυτών των μετάλλων από τα ανακυκλωμένα υλικά είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς μειώνει την ανάγκη για εξόρυξη νέων πόρων και εξασφαλίζει ότι οι πολύτιμοι πόροι θα χρησιμοποιούνται με μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Ορισμένες καινοτόμες μέθοδοι, όπως η πυρομεταλλουργία και η υδρομεταλλουργία, αναπτύσσονται για την αποτελεσματική ανάκτηση αυτών των μετάλλων κατά την ανακύκλωση του χάλυβα.

Η επαναχρησιμοποίηση χάλυβα σε νέες βιομηχανίες είναι επίσης μια τάση που κερδίζει έδαφος. Ο ανακυκλωμένος χάλυβας δεν χρησιμοποιείται μόνο για την κατασκευή κοινών δομικών υλικών και εξαρτημάτων, αλλά ολοένα και περισσότερο χρησιμοποιείται σε υψηλής τεχνολογίας εφαρμογές, όπως στην παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και υποδομών υποστήριξης τεχνολογιών 5G. Η ανάπτυξη νέων εφαρμογών για τον ανακυκλωμένο χάλυβα ενισχύει την αξία του, καθιστώντας τον ένα πολύτιμο υλικό σε νέες και αναπτυσσόμενες βιομηχανίες.

Τέλος, η ενίσχυση της κοινωνικής συνείδησης και της εκπαίδευσης για την ανακύκλωση του χάλυβα αποτελεί μια σημαντική τάση στην ενίσχυση των ποσοστών ανακύκλωσης. Η εκπαίδευση του κοινού, αλλά και των επιχειρήσεων, σχετικά με τα οφέλη της ανακύκλωσης και την ανάγκη για υπεύθυνη διαχείριση των υλικών, είναι κρίσιμη για την επιτυχία αυτών των πρωτοβουλιών. Παράλληλα, οι νομοθετικές ρυθμίσεις και τα κίνητρα για τις επιχειρήσεις να ανακυκλώνουν περισσότερο και να

εφαρμόζουν βιώσιμες πρακτικές στη διαδικασία παραγωγής του χάλυβα ενισχύουν τις προσπάθειες για μια πιο πράσινη βιομηχανία.

Συνολικά, οι νέες τάσεις στην ανακύκλωση του χάλυβα επικεντρώνονται στην εξοικονόμηση πόρων, τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, την ανακάλυψη νέων τεχνολογιών για την επαναχρησιμοποίηση και την πλήρη αξιοποίηση των υλικών, και την ενίσχυση της βιώσιμης ανάπτυξης σε διάφορες βιομηχανίες. Οι καινοτόμες λύσεις στην ανακύκλωση του χάλυβα συμβάλλουν όχι μόνο στην προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και στη δημιουργία ενός πιο αποδοτικού και κυκλικού οικονομικού συστήματος.

2.6 Άτυπος τομέας και ανακύκλωση χαλύβων

Ο άτυπος τομέας στην ανακύκλωση χαλύβων αναφέρεται στις δραστηριότητες που εκτελούνται εκτός του επίσημου, οργανωμένου τομέα ανακύκλωσης, συχνά χωρίς την τήρηση των κανονισμών και των προτύπων που επιβάλλει η νομοθεσία. Αυτός ο τομέας περιλαμβάνει μια ευρεία γκάμα δραστηριοτήτων και εργαλείων που αναλαμβάνονται από μικρότερες επιχειρήσεις ή άτομα, τα οποία συλλέγουν, επεξεργάζονται και ανακυκλώνουν χαλυβουργικά απόβλητα σε μικρότερη κλίμακα, συχνά με περιορισμένες υποδομές και εξοπλισμό. Παρά τις προκλήσεις και τα προβλήματα που σχετίζονται με τον άτυπο τομέα, η συμμετοχή του στην ανακύκλωση χαλύβων είναι σημαντική, καθώς συμβάλλει στην ανακύκλωση μεγάλου μέρους του χάλυβα που θα μπορούσε αλλιώς να καταλήξει σε χώρους υγειονομικής ταφής ή να παραμείνει αχρησιμοποίητο.

Ο άτυπος τομέας στην ανακύκλωση χαλύβων είναι ιδιαίτερα έντονος στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου οι οικονομικές συνθήκες και η έλλειψη υποδομών και επίσημων συστημάτων ανακύκλωσης οδηγούν πολλές κοινότητες σε μια αυθόρμητη και ανεπίσημη συμμετοχή στην ανακύκλωση των μετάλλων. Ο τομέας αυτός

περιλαμβάνει συνήθως ατομικούς συλλέκτες και μικρές επιχειρήσεις που εντοπίζουν και συγκεντρώνουν χαλυβουργικά απόβλητα από διάφορες πηγές, όπως παλαιά αυτοκίνητα, βιομηχανικά και οικιακά απόβλητα, ή ακόμη και από τα αντικείμενα που παραμένουν σε αποθήκες και εγκαταλελειμμένα κτίρια. Αυτά τα απόβλητα αφορούν διάφορους τύπους χαλύβων, που θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν απλό χάλυβα, ατσάλι, ακόμα και ανοξείδωτο χάλυβα και κράματα, τα οποία διαχωρίζονται για να ανακυκλωθούν.

Η διαδικασία ανακύκλωσης στον άτυπο τομέα περιλαμβάνει συχνά βασικές μεθόδους διαχωρισμού και επεξεργασίας του υλικού χωρίς τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών ή υποδομών. Η διαλογή γίνεται συνήθως με το χέρι, όπου τα άτομα που ασχολούνται με τη διαδικασία διαχωρίζουν τα διάφορα μέταλλα και ακαθαρσίες. Στη συνέχεια, ο χάλυβας υποβάλλεται σε θερμική επεξεργασία ή μεταφέρεται σε εγκαταστάσεις όπου γίνεται η συγκόλληση και η κατασκευή προϊόντων από το ανακυκλωμένο υλικό. Παρά τη χαμηλή τεχνολογία που χρησιμοποιείται, η ανακύκλωση χαλύβων από τον άτυπο τομέα προσφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς μειώνει τη ζήτηση για νέες πρώτες ύλες και περιορίζει την ποσότητα των αποβλήτων που καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής.

Ωστόσο, ο άτυπος τομέας στην ανακύκλωση χαλύβων δεν είναι χωρίς προβλήματα. Ένα από τα κύρια ζητήματα που συνδέονται με αυτόν τον τομέα είναι η έλλειψη κανονιστικών πλαισίων και η μη τήρηση περιβαλλοντικών και υγειονομικών προτύπων. Η διαδικασία ανακύκλωσης στον άτυπο τομέα συχνά οδηγεί στην απελευθέρωση ρύπων και τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα και το έδαφος. Ειδικότερα, όταν ο χάλυβας υποβάλλεται σε υψηλή θερμοκρασία χωρίς την κατάλληλη εγκατάσταση ή χωρίς επαγγελματική καθοδήγηση, μπορεί να προκαλέσει την εκπομπή επικίνδυνων αερίων, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO2) και άλλους ρύπους που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Επιπλέον, η διαδικασία αυτή μπορεί να μολύνει το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα με τοξικά μέταλλα και χημικές ουσίες, τα οποία απελευθερώνονται από τα υπολείμματα των επεξεργασμένων μετάλλων.

Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο άτυπος τομέας είναι η ασφάλεια των εργαζομένων. Η έλλειψη εκπαίδευσης, ο ακατάλληλος εξοπλισμός και οι επικίνδυνες συνθήκες εργασίας συνιστούν σοβαρούς κινδύνους για την υγεία των εργαζομένων. Η εκτεταμένη χρήση χειροκίνητων εργαλείων και η απουσία προστατευτικών μέτρων μπορεί να οδηγήσει σε ατυχήματα, τραυματισμούς και εκθέσεις σε επικίνδυνες ουσίες. Παράλληλα, η έλλειψη κανόνων υγιεινής και ασφάλειας καθιστά τον άτυπο τομέα ασταθή και ανασφαλή για τους ανθρώπους που ασχολούνται με την ανακύκλωση.

Παρ' όλα αυτά, ο άτυπος τομέας έχει σημαντική αξία στην κοινωνία, καθώς συμβάλλει στην ανακύκλωση μεγάλων ποσοτήτων χάλυβα που διαφορετικά δεν θα είχαν ανακυκλωθεί. Στην πραγματικότητα, πολλές από τις ανακυκλώσεις χαλύβων σε χώρες με ανεπτυγμένη βιομηχανία προέρχονται από τον άτυπο τομέα, ο οποίος επεξεργάζεται το μεγαλύτερο μέρος του υλικού πριν το παραδώσει στις επίσημες μονάδες ανακύκλωσης. Για να ενισχυθεί η συνεισφορά του άτυπου τομέα στην ανακύκλωση, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν στρατηγικές που να περιλαμβάνουν τη δημιουργία εκπαίδευσης, την ενίσχυση της ασφάλειας των εργαζομένων και την εφαρμογή κανονιστικών πλαισίων που θα μειώσουν τις αρνητικές επιπτώσεις της διαδικασίας για το περιβάλλον.

Η σύμπραξη του άτυπου τομέα με τον επίσημο τομέα ανακύκλωσης είναι μια από τις λύσεις που μπορεί να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα του συστήματος ανακύκλωσης. Η ένταξη των μη οργανωμένων φορέων στην επίσημη διαδικασία ανακύκλωσης μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του ανακυκλωμένου υλικού και να ενισχύσει τις συνθήκες εργασίας στον τομέα. Η δημιουργία εκπαιδευτικών προγραμμάτων, η ενίσχυση των υποδομών συλλογής και διαλογής και η εφαρμογή κινήτρων για τη συμμετοχή των μικρών επιχειρήσεων και ατόμων στον επίσημο τομέα θα βοηθήσουν να μειωθεί η περιβαλλοντική επιβάρυνση και να βελτιωθεί η απόδοση της ανακύκλωσης.

Ο άτυπος τομέας στην ανακύκλωση χαλύβων, παρόλο που έχει κάποιες αρνητικές πλευρές, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παγκόσμια ανακύκλωση και αποτελεί σημαντική συνιστώσα στην κυκλική οικονομία. Η αναγνώριση της αξίας του και η ανάπτυξη στρατηγικών για τη βελτίωση των συνθηκών του μπορούν να

ενισχύσουν την αποδοτικότητα της ανακύκλωσης του χάλυβα και να συμβάλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανακύκλωση αλουμινίου

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η ανακύκλωση αλουμινίου. Αρχικά, μελετάται η διαδικασία παραγωγής αλουμινίου, καθώς και οι ιδιότητες αυτού, ενώ γίνεται αναφορά στους τύπους και τις εφαρμογές αλουμινίου. Εν συνεχεία, εξετάζονται τα απόβλητα παραγωγής αλουμινίου, όπως επίσης και οι τεχνολογίες ανάκτησης για τον περιορισμό των αποβλήτων στην βιομηχανία αλουμινίου. Τέλος, παρατίθενται άλλες πρακτικές που αφορούν την ανακύκλωση αλουμινίου, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών.

3.2 Παραγωγή αλουμινίου

Το μεγαλύτερο ποσοστό αλουμινίου παράγεται από το κύριο μετάλλευμα που είναι ο βωξίτης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο βωξίτης αποτελεί ένα ετερογενές μείγμα ορυκτών, το οποίο αποτελείται από ένα ένυδρο οξείδιο του αλουμινίου όπως μπορεί

να είναι ο γιββσίτης (Al(OH)3 ή Al2O3·3H2O), είτε ο βαιμίτης (AlOOH ή Al2O3H2O), αλλά και το διάσπορο (AlOOH ή Al2O·3H2O). Η χημική σύσταση του βωξίτη συνδέεται άμεσα με την εκάστοτε περιοχή στην οποία βρίσκεται. Στην συνέχεια, στον πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνεται μια τυπική σύσταση του βωξίτη στην περιοχή της Ελλάδος (Χρυσουλάκης & Παντελής,1996).

Στη συνέχεια, στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες του αλουμίνιου (Totten & MacKenzie,2003).

Πίνακας 1: Τυπική χημική σύσταση του βωξίτη στην περιοχή της Ελλάδος

Συστατικό	Περιεκτικότητα κατά βάρος (%)
Al_2O_3	30-60
Fe_2O_3	1-30
SiO_2	0,5-10
TiO_2	0,5-10
CaO	0,1-2
P_2O_5	0,02-1
Οργανικός άνθρακας	0,02-0,4

Για να είναι ο βωξίτης υψηλής περιεκτικότητας, είναι αναγκαίο η περιεκτικότητα του Al_2O_3 να κυμαίνεται στα επίπεδα 45-50%, ενώ η περιεκτικότητα του SiO_2 θα πρέπει να είναι μικρότερη από το 5%. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ορισμένα μεταλλεύματα, τα οποία περιέχουν αλουμίνιο θεωρούνται φθοριούχα, όπως είναι για παράδειγμα ο κρυόλιθος, όπως επίσης και κάποια οξείδια, όπως είναι η σμυρίδα. Κάποια άλλα θεωρούνται πυριτικά όπως είναι ο λευκίτης και ο νεφελίτης. Το χρώμα του βωξίτη είναι ροζ, ενώ όταν υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις σιδήρου, τότε

το χρώμα του βωξίτη είναι κοκκινωπό καφέ, ενώ όταν οι συγκεντρώσεις αυτές είναι χαμηλές, τότε το χρώμα του τείνει προς το λευκό.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εξόρυξη του βωξίτη, γίνεται υπόγεια εκμετάλλευση και στην Ελλάδα χρησιμοποιείται η μέθοδος των θαλάμων και στυλών, είτε εναλλακτικά χρησιμοποιείται η μέθοδος της κατακρήμνισης της οροφής με διαδοχικούς υποορόφους. Ειδικότερα, στην περίπτωση των θαλάμων και στυλών, όταν ο βωξίτης εξορύσσετε υπάρχουν ορισμένα τμήματα, τα οποία παραμένουν ανέπαφα με τη μορφή στυλών, σε διάφορα σχήματα και μεγέθη, προκειμένου να μπορεί να υπάρχει στήριξη του υπερκείμενου εδάφους. Το μέγεθος των ανοιγμάτων και των στύλων παρουσιάζει μεγάλο εύρος, το οποίο συνδέεται με το πάχος του κοιτάσματος, σε σχέση με το ύψος το χώρου, ενώ εξαρτάται και από τις μηχανικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το υπερκείμενο έδαφος. Ακόμη, το μέγεθος των ανοιγμάτων σχετίζεται άμεσα με τις μηχανικές ιδιότητες του μεταλλεύματος, αλλά και με το πεδίο δυνάμεων που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή εξόρυξης.

Αφού ολοκληρωθεί η εξόρυξη του βωξίτη, γίνεται μεταφορά αυτού στους χώρους της επιχείρησης, η οποία και έχει αναλάβει την εκμετάλλευσή του, ενώ υποβάλλεται σε διαδικασίες επεξεργασίας, επιδιώκοντας να απομακρυνθεί όσο το δυνατόν πιο μεγάλη ποσότητα ασβεστίτη, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ύπαρξή του σχετίζεται με την χαμηλή ποιότητα του τελικού προϊόντος (Power et al.,2011).

Ιδιαίτερη μνεία θα πρέπει να γίνει στην παραγωγή αλουμίνας, η οποία πραγματοποιείται βιομηχανικά από τον βωξίτη σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 95%. Η εν λόγω μέθοδος είναι γνωστή ως μέθοδος Bayer και αποτελεί ουσιαστικά μια υδρομεταλλουργική εξαγωγική μέθοδος, η οποία εφαρμόζεται στην βιομηχανία ήδη από το 1890, με την διαδικασία αυτή παραγωγής να θεωρείται κυκλική. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι πρότυπες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την μεταλλουργική αλουμίνα (Mondolfo,2013).

Πίνακας 2: Πρότυπες ιδιότητες μεταλλουργικής αλουμίνας

Φυσικές Ιδιότητες	**Τιμές**
Κοκκομετρία	**Ποσοστό % w/w**
+100mesh	<5
+325mesh	>92
-325mesh	<8
Ειδική επιφάνεια	**Τιμή m^2/g**
	50-80
Υγρασία (573K)	**Ποσοστό % w/w**
	<1
Απώλεια πύρωσης (573-1743K)	**Ποσοστό % w/w**
	<1
Δείκτης φθοράς	4-15% κατά βάρος αύξηση του ποσοστού σωματιδίων <44μm
Χημική Ανάλυση	**Ποσοστό % w/w**
α-Al_2O_3	<20%
Fe_2O_3	<0,015
SiO_2	<0,015
TiO_2	<0,004
CaO	<0,04
Na_2O	<0,4

3.3 Ιδιότητες αλουμινίου

Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο κοινό στοιχείο που βρίσκεται στον φλοιό της γης και το άτομο του διαθέτει 13 ηλεκτρόνια, όπου το καθένα εξ' αυτών διαθέτει μοναδιαίο ηλεκτρικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια του αλουμινίου βρίσκονται σε τρεις στοιβάδες, γύρω από τον πυρήνα, ο οποίος είναι ισχυρά συμπυκνωμένος και διαθέτει θετικό φορτίο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το αλουμίνιο κρυσταλλώνεται με την κυβική διάταξη των ατόμων, όπου η διάταξη αυτή είναι κοινή στα περισσότερα μέταλλα. Βασικό χαρακτηριστικό του αλουμινίου είναι η ελαφρότητά που το χαρακτηρίζει. Καθώς υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας, απαντάται μείωση της πυκνότητάς του, ενώ η χρήση άλλων μετάλλων για τη δημιουργία των σχετικών κραμάτων αλουμινίου δεν επιδρά καθοριστικά στην πυκνότητα, με τις επιδράσεις να αφορούν ένας εύρος +3% έως -2%, ενώ εξαίρεση αποτελούν τα κράματα το λιθίου. Ακόμη, θα πρέπει να

αναφερθεί ότι το βάρος του αλουμινίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές του που σχετίζονται με την κίνηση, ενώ όταν υπάρχει μείωση του βάρους, υπάρχει περισσότερο ωφέλιμο φορτίο, είτε μπορεί να επιτευχθεί μικρότερο κόστος λειτουργίας. Το μικρό βάρος σχετίζεται άμεσα με εξοικονόμηση ενέργειας, όπως επίσης και με τη μείωση των κραδασμών, αλλά και με την βελτίωση της απόδσης των κινούμενων μερών.

Πίνακας 3: Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου

Φυσική ιδιότητα	Τιμή
Ατομικό βάρος	26.98
Ατομικό αριθμός	13
Κρυσταλλική δομή	FCC
Πλευρά μοναδιαίου κελιού	$4.0496*10^{-8}$cm
Πυκνότητα στους 20°C	$2.71 g/cm^3$
Θερμική αγωγιμότητα	2.1-2.3 w/cm*K
Συντελεστής συστολής (60-100°C)	$23.5*1/K*10^6$
Αύξηση όγκου από στερεό σε υγρό	6.5%
Σημείο τήξης	658°C
Λανθάνουσα θερμότητα τήξης	396 j/g
Σημείο βρασμού	2270°C
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	34-36 $m/ohm*mm^2$

Λόγω του μικρού ειδικού βάρους του αλουμινίου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι διπλάσια του χαλκού, αλλά και μεγαλύτερη από κάθε άλλο μέταλλο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το αλουμίνιο διαθέτει πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, προτιμάται για τη χρήση στην βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας και κυρίως στην διανομή ενέργειας υπερύψηλής τάσης. Καθώς το αλουμίνιο διακρίνεται για τη μη μαγνητικότητα του, θεωρείται κατάλληλο για την κατασκευή πολεμικών πλοίων, με την ιδιότητα αυτή να συνδυάζεται με το μικρότερο βάρος, αλλά και με το ελάχιστο κόστος, σε σχέση με τα άλλα μη μαγνητικά μέταλλα. Ακόμη, το αλουμίνιο θεωρείται ιδιαίτερα ανθεκτικό στη διάβρωση, παρόλο που αυτό δεν υπάγεται στην κατηγορία των ευγενών μετάλλων. Ουσιαστικά, η ιδιότητα αυτή συνδέεται με το γεγονός ότι το αλουμίνιο, όπως και τα κράματά του, αντιδρούν με το οξυγόνο, αλλά και με τους υδρατμούς του αέρα, έτσι ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί ένα λεπτό και συμπαγές φιλμ οξειδίου, το οποίο και μπορεί να συμβάλλει στην προστασία του υποκείμενου μετάλλου. Το υγρό περιβάλλον επιταχύνει την διαδικασία της διάβρωσης, ενώ το αλουμίνιο δύναται να υποστεί γαλβανική διάβρωση, είτε διάβρωση αλουμίνας, είτε διάβρωση κοιλοτήτων, αλλά και μικρο-διαβρώσεις. Άλλα είδη διαβρώσεων στα οποία μπορεί να υπόκειται το αλουμίνιο είναι η περικρυσταλλική διάβρωση, η τριχοειδής διάβρωση, όπως επίσης και η διάβρωση απολέπισης.

Περαιτέρω, ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αλουμινίου δεν θεωρείται γραμμικός, αλλά βρίσκεται σε σταθερά επίπεδα, εφόσον οι θερμοκρασίες που επικρατούν κυμαίνεται μεταξύ 20°C και 100°C. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι για τα κράματα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής συνδέεται άμεσα με τη φύση των πρόσθετων στοιχείων, όπως και με την παρουσία πυριτίου, όπως και χαλκού, παρουσιάζοντας αύξηση όταν υπάρχει μαγνήσιο.

3.4 Τύποι και εφαρμογές αλουμινίου

Προκειμένου να παραχθούν βιομηχανικά κράματα αλουμινίου γίνεται χρήση των στοιχείων που απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί.

Σχήμα 1: Στοιχεία που δημιουργούν κράματα με το αλουμίνιο



Τα κράματα του αλουμινίου απαντώνται σε πλήθος εφαρμογών, όπως για παράδειγμα είναι στους τομείς της δόμησης, είτε στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, αλλά και στον τομέα της ναυπηγικής, της αεροναυπηγικής, καθώς και ευρύτερα στην κατασκευή μεγάλων έργων υποδομής. Περαιτέρω, τα

κράματα αυτά βρίσκουν εφαρμογές στον κλάδο της συσκευασίας, όπως και στην κατασκευή ειδικών καταναλωτικών αγαθών, αλλά και σε ηλεκτρολογικές εφαρμογές. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα κράματα τα οποία έχουν δημιουργηθεί με χύτευση, είναι περισσότερο ανθεκτικά σε περιβάλλοντα διάβρωσης.

Μια διάκριση των κραμάτων αλουμινίου μπορεί να γίνει σε πρωτόχυτα και σε δευτερόχυτα, ενώ ένας άλλος διαχωρισμός γίνεται και σύμφωνα με τη χρήση τους. Τα κράματα αλουμινίου, τα οποία και προορίζονται για μηχανική πλαστική παραμόρφωση, προσδιορίζονται από τη χημική τους σύσταση, συνεκτιμώντας ένα διεθνές αποδεκτό σύστημα, το οποίο χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς, με το πρώτο από τα εν λόγω ψηφία να προσδιορίζει την ομάδα του. Κράματος, λαμβάνοντας υπόψη το στοιχείο του κράματος, το οποίο και βρίσκεται σε μεγαλύτερη αναλογία.

Ακολούθως, παρουσιάζονται οι εν λόγω κατηγορίες κραμάτων.

Σειρά 1xxx: Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει κράματα, όπου το καθαρό αλουμίνιο έχει ελάχιστη καθαρότητα 99%, με την κατηγορία αυτή να υποδιαιρείται σε επιμέρους κατηγορίες, συνεκτιμώντας την περιεκτικότητα αυτών σε αλουμίνιο. Χαρακτηριστικό του καθαρού αλουμινίου είναι ότι παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, όπως επίσης και θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, ενώ η ευκολία μορφοποίησης είναι μεγάλη, ενώ οι μηχανικές αντοχές βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα.

Σειρά 2xxx: Η σειρά αυτή περιλαμβάνει τα κράματα αλουμινίου-χαλκού που αποκτούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες, σε σχέση πάντοτε με το μέσο χάλυβα. Τα κράματα αυτά βρίσκουν εφαρμογές κατά κύριο λόγο σε περιπτώσεις κατασκευών, όπου θα πρέπει να υπάρχουν υψηλές μηχανικές αντοχές.

Σειρά 3xxx: Τα κράματα αυτά είναι της κατηγορίας αλουμινίου-μαγνησίου και παρουσιάζουν εύκολη μορφοποίηση, καθώς και καλή αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα κράματα αυτά μπορούν να συγκολλούνται με ιδιαίτερη ευκολία.

Σειρά 4xxx: Τα κράματα της κατηγορίας αυτής, περιέχουν αλουμίνιο-πυρίτιο και εξαιτίας του πυριτίου έχουν μειωμένο σημείο τήξης, βρίσκοντας εφαρμογές σε ηλεκτρόδια πλήρωσης, κυρίως σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου.

Σειρά 5xxx: Στην κατηγορία αυτή υπάγονται τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου, τα οποία παρουσιάζουν καλές ιδιότητες συγκολλητικότητας, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν και καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες για αυτό χαρακτηρίζονται και ως κρυογενικά συστήματα. Ταυτόχρονα, τα κράματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν μέσες μηχανικές αντοχές, ενώ σε θαλάσσιο περιβάλλον παρουσιάζουν αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό, τα συγκεκριμένα κράματα βρίσκουν εφαρμογές στους τομείς της ναυπηγικής, όπως και στην χημική βιομηχανία, αλλά και στην κατασκευή οικοδομικών έργων.

Σειρά 6xxx: Στην σειρά αυτή υπάγονται κράματα αλουμινίου-πυριτίου-μαγνησίου, τα οποία και βρίσκουν εφαρμογές στη διέλαση και στην παραγωγή προφίλ αλουμίνιου.

Σειρά 7xxx: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου, τα οποία και χαρακτηρίζονται από υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Η χρήση αυτών αφορά κυρίως τον τομέα της αεροναυπηγικής και της αεροδιαστημικής. Να σημειωθεί ότι τα κράματα αυτά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στο περιβάλλον, αλλά χαρακτηρίζονται από μέτρια χυτευσιμότητα.

Σειρά 8xxx: Η εν λόγω κατηγορία περιλαμβάνει τα κράματα αλουμινίου τα οποία σχηματίζονται με λίθο, είτε με άλλα σιδηρούχα στοιχεία.

3.5 Απόβλητα παραγωγής αλουμινίου

Τα απόβλητα παραγωγής αλουμινίου αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με τη βιομηχανία αλουμινίου, λόγω της εντατικής κατανάλωσης ενέργειας και των αποβλήτων που παράγονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής του. Η παραγωγή αλουμινίου περιλαμβάνει διάφορες φάσεις, όπως η εξαγωγή αλουμινίου από το βωξίτη και η ηλεκτρόλυση της αλουμίνας για την παραγωγή καθαρού αλουμινίου, και σε κάθε στάδιο παράγονται απόβλητα που επηρεάζουν το περιβάλλον. Η αντιμετώπιση αυτών των αποβλήτων είναι κρίσιμη για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων της βιομηχανίας και τη βελτίωση της βιωσιμότητας της παραγωγής.

Η διαδικασία παραγωγής αλουμινίου ξεκινά με την εξαγωγή αλουμίνας από το βωξίτη, το κύριο ορυκτό που περιέχει αλουμίνιο. Στη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το βωξίτη επεξεργάζεται με υδροξείδιο του νατρίου, παράγοντας αλουμίνα και κόκκινη λάσπη, το πιο σημαντικό απόβλητο από τη διαδικασία επεξεργασίας του βωξίτη. Η κόκκινη λάσπη είναι ένα αλκαλικό απόβλητο που περιέχει σίδηρο, αλουμίνιο, βαρέα μέταλλα και άλλες ακαθαρσίες. Η διάθεσή της σε μεγάλες ποσότητες αποτελεί σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα, καθώς η λάσπη αυτή μπορεί να μολύνει το έδαφος και τα ύδατα με επικίνδυνες ουσίες, αν δεν διαχειριστεί σωστά. Παρά τις προσπάθειες για την επαναχρησιμοποίηση της κόκκινης λάσπης σε διάφορες εφαρμογές, όπως στην παραγωγή δομικών υλικών, η αποθήκευση και διάθεσή της παραμένει μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη βιομηχανία αλουμινίου.

Στη συνέχεια, η διαδικασία παραγωγής αλουμινίου προχωρά στην ηλεκτρόλυση της αλουμίνας για την παραγωγή καθαρού αλουμινίου. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η αλουμίνα λιώνει και υποβάλλεται σε ηλεκτρόλυση, όπου το αλουμίνιο διαχωρίζεται από το οξείδιο του αλουμινίου. Η ηλεκτρόλυση παράγει μεγάλες ποσότητες αερίων, κυρίως διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και φθοριούχων αερίων, τα οποία είναι εξαιρετικά επικίνδυνα για το περιβάλλον. Τα φθοριούχα αέρια είναι αέρια του θερμοκηπίου και η εκπομπή τους συνεισφέρει στην υπερθέρμανση του πλανήτη, ενώ το CO_2, αν και λιγότερο επικίνδυνο σε σύγκριση με τα φθοριούχα αέρια, εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική αιτία για την κλιματική αλλαγή. Εκτός από τα αέρια, η διαδικασία παράγει και σωματίδια που μπορεί να προκαλέσουν ατμοσφαιρική ρύπανση και να επηρεάσουν αρνητικά την ανθρώπινη υγεία.

Η παραγωγή αλουμινίου, λοιπόν, παράγει αρκετά απόβλητα και ρύπους που απαιτούν προσεκτική διαχείριση για να μειωθούν οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κόκκινη λάσπη, τα φθοριούχα αέρια και τα σωματίδια είναι τα κύρια απόβλητα που σχετίζονται με την παραγωγή αλουμινίου. Η σωστή διαχείριση αυτών των αποβλήτων είναι καθοριστική για τη βιωσιμότητα της βιομηχανίας και την προστασία του περιβάλλοντος. Εντούτοις, η παραγωγή αλουμινίου από ανακυκλωμένα υλικά είναι μια λύση που μειώνει δραστικά τις αρνητικές επιπτώσεις, καθώς απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια και παράγει λιγότερα απόβλητα σε σύγκριση με την παραγωγή από πρώτες ύλες.

Η ανακύκλωση του αλουμινίου είναι, αναμφίβολα, μια από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη μείωση των αποβλήτων και τη βελτίωση της βιωσιμότητας της παραγωγής. Το αλουμίνιο είναι ένα από τα πιο ανακυκλώσιμα υλικά, καθώς μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να χάνει τις φυσικές του ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι το ανακυκλωμένο αλουμίνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για την παραγωγή νέων προϊόντων, όπως κουτιά αλουμινίου, εξαρτήματα αυτοκινήτων, εξαρτήματα ηλεκτρονικών συσκευών και οικοδομικά υλικά. Η ανακύκλωση του αλουμινίου μειώνει τη ζήτηση για πρώτες ύλες, εξοικονομεί ενέργεια και περιορίζει την εκπομπή ρύπων, ενώ βοηθά στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων.

Η βιομηχανία αλουμινίου έχει γίνει επίσης πιο ευαισθητοποιημένη σχετικά με τη μείωση των εκπομπών CO_2 και των φθοριούχων αερίων. Εξετάζονται νέες τεχνολογίες και μέθοδοι παραγωγής αλουμινίου που επικεντρώνονται στη μείωση των εκπομπών ρύπων και στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται υδροηλεκτρικά εργοστάσια και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τη λειτουργία των εργοστασίων παραγωγής αλουμινίου, μειώνοντας έτσι το ενεργειακό αποτύπωμα και τις εκπομπές CO_2. Επίσης, η ανάπτυξη πιο αποδοτικών μεθόδων για την ανάκτηση φθοριούχων αερίων κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης μπορεί να μειώσει σημαντικά την περιβαλλοντική επίπτωση της διαδικασίας.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών για την επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των αποβλήτων αλουμινίου αποτελεί κεντρικό στόχο της βιομηχανίας, καθώς οι πιέσεις για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυξάνονται. Ειδικότερα, η ανάκτηση μετάλλων από τα απόβλητα παραγωγής αλουμινίου, όπως από την κόκκινη λάσπη και άλλα παραπροϊόντα, είναι μια περιοχή που ερευνάται εντατικά για να μειώσει την ανάγκη εξόρυξης νέων πόρων και να επαναχρησιμοποιήσει τους διαθέσιμους. Η αποθήκευση και διάθεση αυτών των αποβλήτων με ασφαλή και βιώσιμο τρόπο, καθώς και η ανάπτυξη νέων μεθόδων για την ανάκτηση μετάλλων, είναι το κλειδί για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της βιομηχανίας.

Αναφορικά με την κοινωνική διάσταση, η βιομηχανία αλουμινίου αντιμετωπίζει και προκλήσεις σε ό,τι αφορά την εκπαίδευση των εργαζομένων και την εφαρμογή κανονιστικών προτύπων για τη διαχείριση των αποβλήτων. Οι εργαζόμενοι στον τομέα της παραγωγής και της ανακύκλωσης αλουμινίου χρειάζονται εκπαίδευση

και ενδυνάμωση ώστε να διασφαλιστεί ότι οι διαδικασίες ανακύκλωσης και αποθήκευσης αποβλήτων διεξάγονται με ασφαλή και υπεύθυνο τρόπο.

Εν κατακλείδι, τα απόβλητα παραγωγής αλουμινίου, όπως η κόκκινη λάσπη, τα φθοριούχα αέρια και τα σωματίδια, προκαλούν σοβαρές περιβαλλοντικές ανησυχίες, αλλά η ανακύκλωση του αλουμινίου, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και η βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων προσφέρουν σημαντικές λύσεις για τη μείωση αυτών των επιπτώσεων. Με τη συνεχιζόμενη έρευνα και εφαρμογή αυτών των λύσεων, η βιομηχανία αλουμινίου μπορεί να γίνει πιο βιώσιμη, μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση, τις εκπομπές CO_2 και την παραγωγή αποβλήτων, προσφέροντας ταυτόχρονα νέες δυνατότητες για την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των υλικών.

3.6 Τεχνολογίες ανάκτησης για τον περιορισμό των αποβλήτων στην βιομηχανία αλουμινίου

Η βιομηχανία αλουμινίου είναι γνωστή για τις υψηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της, κυρίως λόγω των αποβλήτων που παράγονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής του αλουμινίου. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και μεθόδων για την ανάκτηση και ανακύκλωση των αποβλήτων έχει επιφέρει σημαντική βελτίωση στη βιωσιμότητα της βιομηχανίας. Η χρήση καινοτόμων τεχνολογιών για τον περιορισμό των αποβλήτων μπορεί να μειώσει τη ρύπανση, να αυξήσει την αποδοτικότητα των διαδικασιών και να ενισχύσει την κυκλική οικονομία.

Η ανάκτηση της κόκκινης λάσπης (red mud) αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της βιομηχανίας αλουμινίου. Η κόκκινη λάσπη είναι το κύριο απόβλητο που παράγεται κατά την επεξεργασία του βωξίτη για την παραγωγή αλουμίνιας, και είναι εξαιρετικά αλκαλική και περιέχει βαρέα μέταλλα. Παρά το γεγονός ότι οι ποσότητες της είναι τεράστιες και η διάθεσή της αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες για την απομάκρυνση της τοξικότητάς της και τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Κάποιες από αυτές περιλαμβάνουν τη χρησιμοποίηση της κόκκινης λάσπης για την παραγωγή δομικών υλικών όπως τσιμέντο ή κεραμίδια, που αξιοποιούν τις φυσικές της ιδιότητες και μειώνουν τον όγκο

της. Επίσης, υπάρχουν τεχνολογίες σταθεροποίησης και αποκατάστασης της κόκκινης λάσπης μέσω χημικών διεργασιών που μειώνουν τη διαρροή επικίνδυνων ουσιών και την τοξικότητά της.

Αναφορικά με τα αέρια ρύπων, η ανάκτηση φθοριούχων αερίων είναι μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην παραγωγή αλουμινίου. Οι φθοριούχοι ενώσεις που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης είναι ισχυρά αέρια του θερμοκηπίου και η μείωση των εκπομπών αυτών είναι κρίσιμη για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Ορισμένες βιομηχανίες χρησιμοποιούν συστήματα ανάκτησης φθοριούχων αερίων που κατακρατούν τα αέρια πριν διαρρεύσουν στην ατμόσφαιρα και τα ανακυκλώνουν ή τα χρησιμοποιούν ξανά στην παραγωγή. Αυτές οι τεχνολογίες συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των εκπομπών CO_2 και στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών ζημιών.

Αξιοσημείωτη είναι η ανάκτηση θερμότητας από τις διεργασίες παραγωγής. Η παραγωγή αλουμινίου είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα, και η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής συνήθως αποβάλλεται στο περιβάλλον. Ωστόσο, σύγχρονες τεχνολογίες επιτρέπουν την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση της θερμότητας αυτής, για παράδειγμα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για άλλες ενεργειακές ανάγκες της παραγωγής. Η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την εξοικονόμηση πόρων, μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα της βιομηχανίας.

Στη διαδικασία ανακύκλωσης αλουμινίου, η βελτιωμένη διαλογή και καθαρισμός των ανακυκλωμένων υλικών αποτελεί επίσης ένα σημαντικό βήμα για τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος και την αύξηση της αποδοτικότητας της ανακύκλωσης. Η χρήση μαγνητικών διαχωριστών, τεχνολογιών φθορισμού και αυτόματων διαλογέων βοηθάει στην ακριβή απομάκρυνση άλλων μετάλλων ή ακαθαρσιών από το ανακυκλωμένο αλουμίνιο. Η αυξημένη καθαρότητα του ανακυκλωμένου αλουμινίου σημαίνει ότι μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε πιο απαιτητικές εφαρμογές, όπως στην αεροναυπηγική και την αυτοκινητοβιομηχανία, χωρίς να μειώνονται οι μηχανικές του ιδιότητες.

Μια ακόμα καινοτόμος τεχνολογία για την περιορισμένη παραγωγή αποβλήτων είναι η ανάκτηση των πολύτιμων μετάλλων που περιέχονται στα απόβλητα αλουμινίου, όπως το χρώμιο, το νικέλιο και το μολυβδαίνιο. Αυτά τα μέταλλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν τις ιδιότητες του αλουμινίου, μπορούν να ανακτηθούν μέσω τεχνολογιών πυρομεταλλουργίας και υδρομεταλλουργίας, οι οποίες επιτρέπουν την ανάκτηση και ανακύκλωση των μετάλλων, μειώνοντας την ανάγκη εξόρυξης νέων πόρων και μειώνοντας τα απόβλητα που προκύπτουν από τη διαδικασία παραγωγής.

Η βελτίωση των διαδικασιών ηλεκτρολυτικής παραγωγής αποτελεί επίσης μία σημαντική καινοτομία στη βιομηχανία αλουμινίου για τη μείωση των αποβλήτων. Νέες τεχνολογίες, όπως η ηλεκτρόλυση σε θερμοκρασία δωματίου, προορίζονται για την εξοικονόμηση ενέργειας και την περιορισμένη παραγωγή αποβλήτων, καθώς μειώνουν τη θερμική κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή. Επιπλέον, οι νέες τεχνολογίες ηλεκτρολύσεως με προηγμένα ηλεκτρολύτες επιτρέπουν την καλύτερη αποδοτικότητα της διαδικασίας, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων και περιορίζοντας τη χρήση πρώτων υλών.

Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, η ενσωμάτωση της ανακύκλωσης αλουμινίου σε μια ολοκληρωμένη στρατηγική διαχείρισης αποβλήτων ενισχύει τη βιωσιμότητα της βιομηχανίας. Η χρήση του ανακυκλωμένου αλουμινίου στη βιομηχανία όχι μόνο μειώνει την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες, αλλά επιτρέπει και την επαναχρησιμοποίηση του υλικού σε διάφορες βιομηχανίες, από την κατασκευή αυτοκινήτων μέχρι τις υποδομές και τα ηλεκτρονικά προϊόντα. Μέσω αυτής της στρατηγικής, μειώνονται τα απόβλητα και ενισχύεται η χρήση των διαθέσιμων πόρων με πιο αποδοτικό και βιώσιμο τρόπο.

Η εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση των εργαζομένων και των επιχειρήσεων για τις νέες τεχνολογίες και τις πρακτικές καλύτερης διαχείρισης των αποβλήτων είναι επίσης κρίσιμης σημασίας. Όσο περισσότερο το προσωπικό είναι ενημερωμένο για τη σωστή διαχείριση των υλικών και την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών ανακύκλωσης, τόσο περισσότερο θα βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας και θα μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Συνολικά, οι νέες τεχνολογίες ανάκτησης και περιορισμού των αποβλήτων στη βιομηχανία αλουμινίου είναι κρίσιμες για την εξοικονόμηση πόρων, την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον. Αυτές οι καινοτομίες συνιστούν σημαντικά βήματα προς μια πιο βιώσιμη και κυκλική βιομηχανία, η οποία δεν εξαρτάται από τη συνεχιζόμενη εξόρυξη πρώτων υλών και παράγει λιγότερα απόβλητα, ενώ ταυτόχρονα ενισχύει την οικονομία και την προστασία του περιβάλλοντος.

3.7 Άλλες πρακτικές ανακύκλωσης αλουμινίου

Αρχικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της ανακύκλωσης του αλουμινίου, αποτελεί και τη βάση λειτουργίας της δευτερογενούς αγοράς αυτού. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το αλουμίνιο αποτελεί ένα από τα πλέον ανακυκλώσιμα υλικά σε παγκόσμιο επίπεδο, με την διαδικασία της ανακύκλωσης να απαιτεί σημαντικά λιγότερες ποσότητες ενέργειας, σε σχέση πάντοτε με την πρωτογενή παραγωγή του αλουμινίου. Καθώς όλο και περισσότερο υπάρχει ενδιαφέρον για την Κυκλική Οικονομία και την βιωσιμότητα, η ανακύκλωση του αλουμινίου προσαρμόζεται κατάλληλα. Από τις πλέον σημαντικές προκλήσεις που απαντώνται στο σκέλος της ανακύκλωσης αλουμινίου είναι η διασφάλιση του επαρκούς εφοδιασμού των απορριμμάτων, αλλά και ο έλεγχος των εκπομπών, ο οποίος είναι αναγκαίος. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι κατά την διαδικασία αυτή της ανακύκλωσης να επιτευχθεί η κατάλληλη χημική σύσταση, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα επιμέρους κράματα αλουμινίου διαθέτουν διαφορετική σύσταση. Περισσότερο ανακυκλώσιμα θεωρούνται τα ελατά και χυτά κράματα αλουμινίου, που μπορούν να υποστούν την κατάλληλη διαδικασία ανακύκλωσης (Schmitz,2006).

Η διαδικασία της ανακύκλωσης μπορεί να χωριστεί σε τρία βήματα. Το πρώτο βήμα σχετίζεται με την βελτίωση των απορριμμάτων αλουμινίου, όπου περιλαμβάνονται διαδικασίες που ακολουθούν την συλλογή των απορριμμάτων, όπως και τη θραύση των απορριμμάτων, καθώς και των διαλογή-ταξινόμηση αυτών. Ακόμη, περιλαμβάνεται η αρχική θερμική επεξεργασία αυτών. Εν συνεχεία, στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας αυτής ανακύκλωσης, λαμβάνει χώρα η τήξη του αλουμινίου, όπως επίσης και η βελτίωση αυτού, ενώ το τρίτο και τελικό στάδιο σχετίζεται με την

παραγωγή πρωτογενούς αλουμινίου, το οποίο και έχει τη μορφή πλινθωμάτων αλουμινίου μέσω χύτευση. Υπάρχει άμεση συσχέτιση της διαδικασίας ανακύκλωσης αλουμινίου με την προέλευση, την χρήση, όπως επίσης και την κατάσταση των αποβλήτων του αλουμινίου (Τσώκου,2019).

Ξεχωριστή διαδικασία αποτελεί η βελτίωση των απορριμμάτων, τα οποία και ανακυκλώνονται, στο πλαίσιο της ανακύκλωσης αλουμινίου. Η συλλογή των απορριμμάτων αφορά κράματα αλουμινίου, τα οποία και διαθέτουν κάποια μηχανική βλάβη, είτε πλέον δεν χρησιμοποιούνται, προκειμένου να υπάρξει επαναφορά στον κύκλο ζωής τους. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι το σύνολο του υλικού του αλουμινίου, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη αν αυτό έχει αρχική μορφή, είτε χρησιμοποιείται εκ νέου, αποτελούν τα απορρίμματα του αλουμινίου. Ακόμη, να σημειωθεί ότι τα απορρίμματα, τα οποία αποτελούνται από διαφορετικά κράματα μπορεί να περιέχουν άλλα μεταλλικά, είτε μη μεταλλικά υλικά, όπως είναι τα σιδηρούχα μέταλλα, τα πλαστικά στοιχεία κτλ, τα οποία και μολύνουν τη σύσταση. Επομένως, είναι αναγκαίο να υπάρχει καθαρισμός από τις περισσότερες ακαθαρσίες, ενώ θα πρέπει να γίνει και η κατάλληλη ταξινόμηση αυτών, προκειμένου να μπορεί να επιτευχθεί και η σχετική διαδικασία βελτίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανακύκλωση χαλκού

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην ανακύκλωση του χαλκού. Αρχικά, μελετάται ο χαλκός, οι ιδιότητες, οι κατηγορίες αυτού, καθώς και οι χρήσεις που έχει σήμερα. Ακολούθως, εξετάζεται αναλυτικά η ανακύκλωση του χαλκού, καθώς και οι εφαρμογές που βρίσκουν τα ανακυκλώσιμα προϊόντα χαλκού, ενώ τέλος αναδεικνύονται σύγχρονες τάσεις και πρακτικές στην ανακύκλωση χαλκού.

4.2 Ο χαλκός

Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σημαντικά και χρησιμοποιούμενα μέταλλα στην ανθρώπινη ιστορία και βιομηχανία. Χρησιμοποιείται για μια ποικιλία εφαρμογών, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως την κατασκευή εργαλείων και κοσμημάτων. Η αξία του βασίζεται στις εξαιρετικές του ιδιότητες, όπως η εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, η ανθεκτικότητα και η ευχρηστία του στην επεξεργασία.

Ο χαλκός είναι ένα από τα πρώτα μέταλλα που χρησιμοποίησαν οι άνθρωποι. Από την αρχαιότητα, οι πολιτισμοί, όπως οι Αιγύπτιοι, οι Μεσοποτάμιοι και οι Έλληνες, χρησιμοποίησαν τον χαλκό για τη δημιουργία εργαλείων, όπλων και κοσμημάτων. Μάλιστα, η εποχή του χαλκού (περίπου 3000 π.Χ.) είναι μια από τις πρώτες αναγνωρίσιμες εποχές στην ιστορία της ανθρωπότητας, καθώς το μέταλλο αυτό αποτέλεσε θεμελιώδες υλικό για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και των πολιτισμών. Η μετάβαση από την εποχή του χαλκού στην εποχή του σιδήρου άνοιξε νέες δυνατότητες στην κατασκευή και τα εργαλεία, αλλά ο χαλκός εξακολούθησε να είναι σημαντικός και σήμερα.

Αναφορικά με τις φυσικές του ιδιότητες, ο χαλκός είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού και της θερμότητας. Η εξαιρετική αγωγιμότητά του είναι ένας από τους λόγους που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εφαρμογών. Οι ηλεκτρικές συσκευές, τα καλώδια και τα κυκλώματα βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στον χαλκό για την αποδοτική μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο

χαλκός δεν είναι μόνο ιδανικός για τις ηλεκτρικές εφαρμογές, αλλά επίσης έχει εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση και είναι ανθεκτικός σε πολλές χημικές ενώσεις. Αυτό τον καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές σε υγρούς ή ακραίους περιβαλλοντικούς όρους, όπως τα υδραυλικά συστήματα, τις σωληνώσεις, και τα μέρη των αεροσκαφών και των πλοίων.

Ο χαλκός είναι επίσης ένα πολύ χρήσιμο υλικό στη βιομηχανία κατασκευών και αρχιτεκτονικής. Η ανθεκτικότητα του στο πέρασμα του χρόνου και η ικανότητά του να αναπτύσσει μια φυσική πράσινη πατίνα κατά τη διάρκεια της οξείδωσης, τον καθιστά ιδανικό για εξωτερικές κατασκευές, όπως στέγες, φράκτες και διακοσμητικά στοιχεία. Η πατίνα αυτή προσφέρει φυσική προστασία από τη διάβρωση, καθιστώντας τον χαλκό ιδανικό για τις υπαίθριες κατασκευές, οι οποίες αντιμετωπίζουν συνεχώς τις φθορές από την ηλιακή ακτινοβολία, τις βροχές και τις αλλαγές στη θερμοκρασία.

Η βιομηχανία κατασκευών δεν είναι η μόνη που επωφελείται από τις ιδιότητες του χαλκού. Ο χαλκός χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπου τα συστήματα φρένων και ψύξης, καθώς και τα ηλεκτρικά καλώδια, βασίζονται στη συνεισφορά του χαλκού. Τα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν μεγάλο όγκο χαλκού για τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και για τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας, καθώς η θέρμανση και ψύξη του κινητήρα απαιτούν την αποδοτική διάχυση της θερμότητας.

Ο χαλκός είναι επίσης σημαντικός για την υγειονομική βιομηχανία, λόγω των αντιμικροβιακών του ιδιοτήτων. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο χαλκός και τα κράματα του, όπως ο ορείχαλκος, είναι φυσικά αντιμικροβιακά και μπορούν να καταστρέφουν βακτήρια, ιούς και μύκητες σε επαφή με την επιφάνειά τους. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλό επίπεδο υγιεινής, όπως σε ιατρικές συσκευές και σε εργαλεία χειρουργικής, καθώς και σε διάφορες επιφάνειες, όπως χειρολαβές και βρύσες σε νοσοκομεία και δημόσιους χώρους.

Η ανακύκλωση του χαλκού είναι επίσης μία από τις πιο σημαντικές διαδικασίες για την προστασία του περιβάλλοντος και την εξοικονόμηση πόρων. Ο χαλκός είναι εξαιρετικά ανακυκλώσιμος και μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να χάσει τις φυσικές του ιδιότητες. Η ανακύκλωση του χαλκού μειώνει την ανάγκη εξόρυξης νέων πρώτων υλών και μειώνει σημαντικά τις εκπομπές CO2 που συνδέονται με τη

διαδικασία παραγωγής. Σε κάθε βήμα της ανακύκλωσης, η ενέργεια που απαιτείται είναι πολύ μικρότερη από εκείνη που απαιτείται για την παραγωγή νέου χαλκού από πρώτες ύλες. Έτσι, η ανακύκλωση χαλκού έχει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη και βοηθά στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της βιομηχανίας.

Η ανακύκλωση χαλκού είναι εξαιρετικά αποδοτική και έχει χαμηλό κόστος, γεγονός που καθιστά το υλικό εξαιρετικά δημοφιλές στις βιομηχανίες ηλεκτρονικών συσκευών και συστημάτων υποδομής. Στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών, ο χαλκός χρησιμοποιείται για την παραγωγή καλωδίων και άλλων εξαρτημάτων, καθώς η αγωγιμότητά του και η αντοχή του στη διάβρωση τον καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετική απόδοση και αντοχή σε μακροχρόνια χρήση. Ειδικότερα, στην κατασκευή υπολογιστών, τηλεοράσεων, κινητών τηλεφώνων και άλλων συσκευών, ο χαλκός είναι ένα κρίσιμο υλικό για την εγγύηση της σταθερότητας των συστημάτων.

Εκτός από την ανακύκλωση του χαλκού, η βιώσιμη εξόρυξή του έχει επίσης τεράστια σημασία. Όμως, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξόρυξης μπορεί να είναι σημαντικές, όπως η καταστροφή οικοσυστημάτων και η ρύπανση του νερού. Για αυτόν τον λόγο, η μετάβαση σε βιώσιμες πρακτικές εξόρυξης και η ανάπτυξη τεχνολογιών που ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις αυτής της διαδικασίας είναι απαραίτητη για την προστασία του περιβάλλοντος.

Ο χαλκός είναι, επομένως, ένα υλικό που συνδυάζει τεχνολογική σημασία και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της ανακύκλωσης και της εξόρυξης χαλκού, καθώς και η καινοτομία στις εφαρμογές του, διασφαλίζουν ότι θα παραμείνει ένα βασικό υλικό για τη σύγχρονη βιομηχανία και τις επόμενες γενιές

4.3 Ιδιότητες και κατηγορίες χαλκού

Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα μέταλλα στον κόσμο, και οι ιδιότητές του το καθιστούν εξαιρετικά πολύτιμο σε πληθώρα εφαρμογών. Από την αρχαιότητα, ο χαλκός ήταν ένα από τα πρώτα μέταλλα που χρησιμοποίησαν οι άνθρωποι, και παραμένει κρίσιμος παράγοντας σε βιομηχανίες που απαιτούν υλικά υψηλής ποιότητας, όπως η ηλεκτρονική, η κατασκευή, η αυτοκινητοβιομηχανία και άλλες. Οι φυσικές του ιδιότητες, όπως η εξαιρετική αγωγιμότητα του ηλεκτρισμού και της θερμότητας, η ανθεκτικότητα και η ευκολία στην επεξεργασία του, είναι βασικές για τις εφαρμογές του στην καθημερινή ζωή και τη βιομηχανία.

Ο χαλκός είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού και της θερμότητας. Αυτή η ιδιότητά του τον καθιστά το πιο χρησιμοποιούμενο μέταλλο για την κατασκευή ηλεκτρικών καλωδίων, κυκλωμάτων, και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών. Ο χαλκός έχει επίσης εξαιρετική ανθεκτικότητα στη διάβρωση, πράγμα που τον καθιστά ιδανικό για χρήση σε υδραυλικά συστήματα και σε εφαρμογές που απαιτούν μακροχρόνια διάρκεια και αντίσταση στις εξωτερικές συνθήκες. Η υψηλή αντίσταση στη διάβρωση τον καθιστά κατάλληλο για χρήση σε εξωτερικές εφαρμογές, όπως στέγες, διακοσμητικά στοιχεία και φράκτες, όπου η φυσική οξείδωση δημιουργεί μια προστατευτική πατίνα που ενισχύει τη μακροχρόνια αντοχή του.

Ο χαλκός είναι επίσης πολύ εύκολος στη συγκόλληση και στην επεξεργασία, κάτι που τον καθιστά ιδανικό για μια πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών. Είναι σχετικά μαλακός και εύκαμπτος, επιτρέποντας την κατασκευή προϊόντων που απαιτούν λεπτομερειακή εργασία, όπως μικρά εξαρτήματα και εργαλεία. Η ευκολία με την οποία μπορεί να επεξεργαστεί χωρίς να χάσει τις φυσικές του ιδιότητες, καθώς και η ικανότητά του να ανακυκλώνεται επανειλημμένα χωρίς να χάνει την ποιότητά του, ενισχύει την αξία του ως υλικό στην κυκλική οικονομία.

Ο χαλκός διατίθεται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με την καθαρότητά του, τη σύνθεσή του και τις ειδικές ιδιότητες που αποκτά μέσω προσμίξεων με άλλα μέταλλα. Οι βασικές κατηγορίες χαλύβων περιλαμβάνουν τους καθαρούς χαλκούς, τους κραμάτων χαλκού, και τους ανακυκλωμένους χαλκούς.

Ο καθαρός χαλκός είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος και περιέχει τουλάχιστον 99% χαλκό. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικών καλωδίων, κυκλωμάτων, και σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αγωγιμότητα. Το κύριο πλεονέκτημα του καθαρού χαλκού είναι η εξαιρετική του αγωγιμότητα, αλλά το μειονέκτημά του είναι ότι είναι πιο επιρρεπής στη διάβρωση, ιδίως σε εξωτερικές συνθήκες.

Ο χαλκός κράματος αναφέρεται σε χαλκό που έχει αναμειχθεί με άλλα μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το νικέλιο, το ψευδάργυρο ή το κασσίτερο, για να αποκτήσει βελτιωμένες ιδιότητες. Ένα από τα πιο συνηθισμένα κράματα χαλκού είναι ο ορείχαλκος, που αποτελείται από χαλκό και ψευδάργυρο, και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κοσμημάτων, οργάνων και διακοσμητικών αντικειμένων. Επίσης, το μπρούντζος, που αποτελεί κράμα χαλκού και κασσίτερου, είναι εξαιρετικά ανθεκτικός στη διάβρωση και χρησιμοποιείται συχνά για να κατασκευάσει εξαρτήματα μηχανημάτων, εργαλεία και μέρη που έρχονται σε επαφή με υγρά ή χημικά.

Ο ανακυκλωμένος χαλκός προέρχεται από τη διαδικασία ανακύκλωσης παλαιών προϊόντων που περιέχουν χαλκό, όπως καλώδια, αυτοκίνητα και άλλες συσκευές. Ο ανακυκλωμένος χαλκός διατηρεί τις φυσικές του ιδιότητες και χρησιμοποιείται σε πολλές από τις ίδιες εφαρμογές με τον καθαρό χαλκό. Η ανακύκλωση του χαλκού είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μειώνει την ανάγκη για εξόρυξη νέων πρώτων υλών και μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής.

Η χρήση χαλκού σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές είναι από τις πιο κοινές και καθοριστικές για τη βιομηχανία. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή καλωδίων υψηλής απόδοσης, κυκλωμάτων, κινητήρων και συστημάτων μεταφοράς ενέργειας. Η εξαιρετική του αγωγιμότητα τον καθιστά ιδανικό για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με ελάχιστες απώλειες.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, ο χαλκός χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για τη δημιουργία εξαρτημάτων όπως τα συστήματα φρένων, τις ψύκτρες και τα καλώδια. Η ανάγκη για υλικά που προσφέρουν τόσο αντοχή όσο και καλή θερμική αγωγιμότητα καθιστά τον χαλκό απαραίτητο για την κατασκευή αυτοκινήτων και κινητήρων.

Ο έχει επίσης μεγάλη σημασία λόγω της αντοχής του στη διάβρωση και της ικανότητάς του να αποκτά μια φυσική προστατευτική επικάλυψη (πατίνα) όταν εκτίθεται στο εξωτερικό περιβάλλον. Χρησιμοποιείται σε στέγες, τοίχους και διακοσμητικά στοιχεία, καθώς προσφέρει όχι μόνο αισθητική αξία αλλά και μακροχρόνια προστασία από τις καιρικές συνθήκες.

Η ανακύκλωση του χαλκού είναι ίσως η πιο αποδοτική διαδικασία ανακύκλωσης στον κόσμο. Η επαναχρησιμοποίηση του χαλκού δεν περιορίζεται στην απλή επεξεργασία των απόβλητων, αλλά περιλαμβάνει τη συλλογή, τη διαλογή και την ανακύκλωση παλαιών προϊόντων που περιέχουν χαλκό. Αυτή η διαδικασία μειώνει την ανάγκη εξόρυξης νέων πόρων και επιτρέπει τη συνεχιζόμενη χρήση του υλικού σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Το γεγονός ότι ο χαλκός μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να χάνει τις φυσικές του ιδιότητες τον καθιστά ιδανικό για κυκλικές οικονομικές διαδικασίες, όπου τα υλικά παραμένουν εντός της παραγωγικής αλυσίδας για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Συνολικά, ο χαλκός παραμένει ένα από τα πιο χρήσιμα μέταλλα στην βιομηχανία λόγω των μοναδικών του φυσικών ιδιοτήτων, της ανθεκτικότητάς του και της ικανότητάς του να ανακυκλώνεται και να επαναχρησιμοποιείται. Από την παραγωγή ενέργειας μέχρι την κατασκευή, από τη βιομηχανία κατασκευών μέχρι την αρχιτεκτονική και την ηλεκτρονική, ο χαλκός εξακολουθεί να είναι θεμελιώδης παράγοντας για την ανάπτυξη και την εξέλιξη της σύγχρονης κοινωνίας.

4.4 Ανακύκλωση χαλκού

Η ανακύκλωση χαλκού είναι μια διαδικασία που έχει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο ανακυκλώσιμα υλικά, καθώς μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να χάνει τις φυσικές του

ιδιότητες. Αυτό καθιστά την ανακύκλωση του χαλκού ιδιαίτερα αποδοτική, καθώς μειώνει την ανάγκη εξόρυξης νέων πόρων, εξοικονομεί ενέργεια και μειώνει τις εκπομπές CO_2, συμβάλλοντας στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

Η διαδικασία ανακύκλωσης του χαλκού περιλαμβάνει διάφορα στάδια, τα οποία ξεκινούν με τη συλλογή των αποβλήτων χαλκού. Τα απόβλητα αυτά μπορεί να προέρχονται από παλιά καλώδια, αυτοκίνητα, ηλεκτρικές συσκευές, ή απόβλητα βιομηχανίας και κατασκευών. Αφού συλλεχθούν τα υλικά, τα απορρίμματα πρέπει να υποβληθούν σε διαλογή για να διαχωριστούν τα διάφορα μέταλλα και άλλες ακαθαρσίες. Σε αυτό το στάδιο, ο χαλκός διαχωρίζεται από άλλα υλικά, όπως το αλουμίνιο, το πλαστικό και το γυαλί, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη καθαρότητα του τελικού προϊόντος.

Μόλις το υλικό καθαριστεί και διαχωριστεί, το ανακυκλωμένο χαλκό περνά στη διαδικασία τήξης**,** όπου λιώνει σε ειδικούς κλιβάνους σε υψηλές θερμοκρασίες. Η διαδικασία αυτή απαιτεί λιγότερη ενέργεια από την παραγωγή νέου χαλκού από τις πρώτες ύλες. Συγκεκριμένα, η ανακύκλωση του χαλκού απαιτεί περίπου το 85-90% λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με την παραγωγή από ορυκτά, γεγονός που καθιστά την ανακύκλωση μια πολύ αποδοτική διαδικασία. Ο χαλκός που παράγεται από την ανακύκλωση μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή νέων προϊόντων, όπως καλώδια, ηλεκτρικές συσκευές, σωληνώσεις και διάφορα άλλα βιομηχανικά προϊόντα.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της ανακύκλωσης του χαλκού είναι ότι δεν χάνει την ποιότητά του κατά την ανακύκλωση. Ο χαλκός μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να υποστεί φθορά, κάτι που τον καθιστά ιδανικό για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αγωγιμότητα και ανθεκτικότητα. Για παράδειγμα, οι βιομηχανίες ηλεκτρονικών συσκευών και ηλεκτρικών καλωδίων βασίζονται στον ανακυκλωμένο χαλκό για να κατασκευάσουν νέες συσκευές και συστήματα, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για την εξόρυξη νέων πόρων.

Η ανακύκλωση χαλκού συμβάλλει επίσης στην μείωση της ρύπανσης και της κατανάλωσης φυσικών πόρων. Ο χαλκός εξορύσσετε από ορυκτά, μια διαδικασία που απαιτεί τεράστιες ποσότητες ενέργειας και προκαλεί σημαντική περιβαλλοντική

επιβάρυνση λόγω των εκπομπών CO_2 και άλλων τοξικών αερίων. Η ανακύκλωση του χαλκού μειώνει τη ζήτηση για εξόρυξη νέων μετάλλων, μειώνοντας έτσι την πίεση στους φυσικούς πόρους και τις αρνητικές επιπτώσεις της εξόρυξης.

Η ανακύκλωση χαλκού έχει επίσης σημαντικά οικονομικά οφέλη**.** Ο χαλκός, λόγω των εξαιρετικών χαρακτηριστικών του και της ευρείας χρήσης του σε διάφορους τομείς, παραμένει πολύτιμο υλικό στην αγορά. Η ανακύκλωσή του μειώνει το κόστος παραγωγής για τις βιομηχανίες που χρησιμοποιούν χαλκό, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί θέσεις εργασίας στον τομέα της ανακύκλωσης. Οι βιομηχανίες που ασχολούνται με την ανακύκλωση χαλκού και τη διαχείριση των αποβλήτων προσφέρουν σημαντική υποστήριξη στην τοπική οικονομία, ενώ ενισχύουν τις πρακτικές βιώσιμης ανάπτυξης.

Η βιομηχανία ανακύκλωσης χαλκού έχει αναπτυχθεί με γοργούς ρυθμούς και έχει γίνει σημαντικός πυλώνας της κυκλικής οικονομίας, όπου τα υλικά παραμένουν στον κύκλο παραγωγής για μεγάλο χρονικό διάστημα, αντί να καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η πρόοδος στις τεχνολογίες διαλογής, αποθήκευσης και τήξης, σε συνδυασμό με την αύξηση της ζήτησης για ανακυκλωμένα υλικά, έχει βοηθήσει στην ανάπτυξη αυτής της βιομηχανίας, καθιστώντας την πιο αποδοτική και βιώσιμη.

Η ανακύκλωση του χαλκού, πέρα από τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, προάγει επίσης την καινοτομία**.** Οι νέες τεχνολογίες που εφαρμόζονται στην ανακύκλωση επιτρέπουν την εξαγωγή του χαλκού από πιο περίπλοκα υλικά, όπως τα ηλεκτρονικά απόβλητα. Η ανακύκλωση χαλκού από κατεστραμμένες ηλεκτρονικές συσκευές είναι μια ταχέως αναπτυσσόμενη πρακτική, που όχι μόνο συμβάλλει στην εξοικονόμηση πόρων αλλά μειώνει και τη ρύπανση από τις επικίνδυνες ουσίες που περιέχονται στις συσκευές αυτές.

Εν κατακλείδι, η ανακύκλωση χαλκού είναι μια από τις πιο αποδοτικές και βιώσιμες διαδικασίες στον τομέα των μετάλλων. Εξοικονομεί ενέργεια, περιορίζει την ανάγκη για πρώτες ύλες, μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και έχει σημαντικά οικονομικά οφέλη. Η συνεχιζόμενη βελτίωση των τεχνολογιών ανακύκλωσης και η ευαισθητοποίηση της κοινωνίας για τα οφέλη της ανακύκλωσης ενισχύουν τη σημασία του χαλκού ως υλικού και ενισχύουν την πορεία προς μια πιο βιώσιμη και κυκλική οικονομία.

4.5 Εφαρμογές ανακυκλώσιμων προϊόντων χαλκού

Η ανακύκλωση του χαλκού αποτελεί μία από τις πιο αποδοτικές διαδικασίες στον τομέα της ανακύκλωσης, καθώς το υλικό μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να χάσει τις φυσικές του ιδιότητες. Αυτή η ικανότητα του χαλκού να επαναχρησιμοποιείται χωρίς να υποβαθμίζεται καθιστά την ανακύκλωση του ιδιαίτερα πολύτιμη, όχι μόνο για την εξοικονόμηση φυσικών πόρων αλλά και για την προστασία του περιβάλλοντος. Τα ανακυκλωμένα προϊόντα χαλκού έχουν ευρεία χρήση σε πολλές βιομηχανίες, και οι εφαρμογές τους είναι εξαιρετικά ποικίλες και σημαντικές για τη σύγχρονη κοινωνία.

Μια από τις πιο γνωστές και σημαντικές εφαρμογές του ανακυκλωμένου χαλκού είναι στη βιομηχανία ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών. Ο χαλκός είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού και χρησιμοποιείται εκτενώς για την κατασκευή καλωδίων, κυκλωμάτων και άλλων ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Η ανακύκλωση του χαλκού επιτρέπει τη μείωση της ανάγκης για νέες πρώτες ύλες, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής και την εξοικονόμηση ενέργειας. Τα καλώδια, οι υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές χρησιμοποιούν χαλκό για τη διασφάλιση της αγωγιμότητας και της λειτουργικότητάς τους. Η ανακύκλωση του χαλκού επιτρέπει την ανανέωση αυτών των εξαρτημάτων χωρίς να απαιτείται η εξόρυξη νέων πόρων.

Η βιομηχανία αυτοκινήτων είναι επίσης ένας τομέας όπου ο ανακυκλωμένος χαλκός έχει εκτεταμένη χρήση. Ο χαλκός χρησιμοποιείται στην κατασκευή συστημάτων φρένων, κινητήρων, συστημάτων ψύξης και άλλων εξαρτημάτων αυτοκινήτων. Αντί να καταλήγουν σε χωματερές, τα παλαιά αυτοκίνητα που περιέχουν χαλκό ανακυκλώνονται, και ο χαλκός που εξάγεται μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την κατασκευή νέων εξαρτημάτων. Η ανακύκλωση χαλκού στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας μειώνει τη ζήτηση για νέες πρώτες ύλες και ελαχιστοποιεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής αυτοκινήτων.

Ένας άλλος τομέας όπου ο ανακυκλωμένος χαλκός βρίσκει εφαρμογή είναι η βιομηχανία κατασκευών. Ο χαλκός χρησιμοποιείται σε διάφορες κατασκευαστικές

εφαρμογές, όπως στις σωληνώσεις ύδρευσης, τη θέρμανση και την αποχέτευση. Η αντοχή του στη διάβρωση και η ανθεκτικότητά του τον καθιστούν ιδανικό για χρήση σε υδραυλικά συστήματα. Η ανακύκλωση χαλκού επιτρέπει την παραγωγή νέων σωληνώσεων και εξαρτημάτων για τις κατασκευές χωρίς την ανάγκη εξόρυξης νέου χαλκού, μειώνοντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την εξόρυξη και τη μεταφορά του μετάλλου.

Επιπλέον, ο χαλκός χρησιμοποιείται ευρέως στην αρχιτεκτονική και στις διακοσμητικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή στέγης, φράκτες, διακοσμητικά στοιχεία και άλλα αρχιτεκτονικά στοιχεία λόγω της ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση και της αισθητικής του εμφάνισης. Όταν εκτίθεται στις καιρικές συνθήκες, ο χαλκός αναπτύσσει την χαρακτηριστική πράσινη πατίνα, η οποία προσδίδει μια μοναδική αισθητική αξία στα κτίρια και τα μνημεία. Οι εφαρμογές του ανακυκλωμένου χαλκού σε αυτά τα έργα βοηθούν στη μείωση της ζήτησης για πρώτες ύλες και συνεισφέρουν στη δημιουργία βιώσιμων κατασκευών.

Η βιομηχανία αεροπορίας και οι ναυπηγικές βιομηχανίες χρησιμοποιούν επίσης ανακυκλωμένο χαλκό για την κατασκευή εξαρτημάτων που απαιτούν αντοχή και καλή θερμική αγωγιμότητα. Τα συστήματα ψύξης, οι ηλεκτρικές συνδέσεις και οι κινητήρες σε αεροπλάνα και πλοία συνήθως περιέχουν χαλκό, και η ανακύκλωσή του επιτρέπει τη συνεχιζόμενη χρήση αυτού του πολύτιμου υλικού χωρίς να απαιτείται η εξόρυξη νέου χαλκού. Αυτές οι βιομηχανίες επωφελούνται από την υψηλή ποιότητα του ανακυκλωμένου χαλκού, ο οποίος έχει τις ίδιες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες με τον νέο χαλκό.

Ο τομέας της ενέργειας εκμεταλλεύεται επίσης το ανακυκλωμένο χαλκό για την παραγωγή εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα ηλιακά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες. Ο χαλκός χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλιακά πάνελ, για την κατασκευή μετατροπέων και για τις συνδέσεις των ανεμογεννητριών, οι οποίες απαιτούν υλικά υψηλής ποιότητας για την αποδοτική μεταφορά και αποθήκευση ενέργειας. Η ανακύκλωση χαλκού μειώνει την ανάγκη για την παραγωγή νέου χαλκού και συμβάλλει στη βιωσιμότητα της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Η ανακύκλωση του χαλκού προσφέρει επίσης πλεονεκτήματα σε βιομηχανίες ηλεκτρονικών. Ο χαλκός βρίσκεται σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τηλεοράσεις, υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα. Η ανακύκλωση αυτών των συσκευών οδηγεί στην ανάκτηση του χαλκού, το οποίο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την παραγωγή νέων συσκευών, μειώνοντας έτσι την ποσότητα των αποβλήτων και την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες. Η ανακύκλωση των ηλεκτρονικών αποβλήτων είναι μια βιώσιμη πρακτική που επιτρέπει την αξιοποίηση του χαλκού και άλλων πολύτιμων μετάλλων με τρόπο που να προστατεύει το περιβάλλον.

Συνολικά, ο ανακυκλωμένος χαλκός έχει πολλές εφαρμογές σε διαφορετικούς τομείς της βιομηχανίας, από την κατασκευή καλωδίων και συστημάτων υποδομών μέχρι την αεροπορία και την παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανακύκλωση χαλκού συμβάλλει στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και στην ενίσχυση της βιώσιμης ανάπτυξης, κάνοντάς τον ένα από τα πιο αξιόπιστα και αποτελεσματικά υλικά για τη σύγχρονη κοινωνία.

4.6 Σύγχρονες τάσεις και πρακτικές στην ανακύκλωση χαλκού

Η ανακύκλωση χαλκού έχει εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια, καθώς η βιομηχανία αναζητά όλο και πιο βιώσιμες και αποδοτικές μεθόδους για την επαναχρησιμοποίηση αυτού του πολύτιμου μετάλλου. Ο χαλκός, λόγω των εξαιρετικών φυσικών του ιδιοτήτων και της ικανότητάς του να ανακυκλώνεται επανειλημμένα χωρίς να χάνει την ποιότητά του, είναι ένα από τα πιο ανακυκλώσιμα υλικά και η διαδικασία ανακύκλωσης του έχει σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την οικονομία. Ωστόσο, οι σύγχρονες τάσεις και πρακτικές στην ανακύκλωση του χαλκού επικεντρώνονται στην αποτελεσματικότητα, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την αύξηση της οικονομικής αποδοτικότητας της διαδικασίας.

Μία από τις κύριες τάσεις στην ανακύκλωση χαλκού είναι η βελτίωση της ποιότητας του ανακυκλωμένου υλικού. Αν και ο χαλκός μπορεί να ανακυκλωθεί πολλές φορές χωρίς να χάσει τις φυσικές του ιδιότητες, η καθαρότητα του ανακυκλωμένου χαλκού μπορεί να επηρεαστεί από ακαθαρσίες που περιέχονται στο υλικό κατά τη διάρκεια της συλλογής και διαλογής. Σύγχρονες τεχνολογίες, όπως η μαγνητική διαλογή, η φθορισμού και οι αυτόματοι διαχωριστές, επιτρέπουν την ακριβή

απομάκρυνση άλλων μετάλλων ή ακαθαρσιών από το ανακυκλωμένο χαλκό, εξασφαλίζοντας την υψηλότερη δυνατή ποιότητα του τελικού προϊόντος. Αυτή η διαδικασία καθιστά τον ανακυκλωμένο χαλκό κατάλληλο για επαναχρησιμοποίηση σε πιο απαιτητικές εφαρμογές, όπως η κατασκευή ηλεκτρικών καλωδίων, εξαρτημάτων αυτοκινήτων ή άλλων προϊόντων που απαιτούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

Επιπλέον, η ανάκτηση μετάλλων από σύνθετα απόβλητα είναι μια άλλη σύγχρονη τάση στην ανακύκλωση χαλκού. Πολλές φορές ο χαλκός βρίσκεται σε μικρές ποσότητες σε σύνθετα απόβλητα, όπως ηλεκτρονικά απόβλητα (e-waste), κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές και τηλεοράσεις, οι οποίες περιέχουν όχι μόνο χαλκό αλλά και άλλα μέταλλα, όπως το χρυσό, το αργυρό ή το παλλάδιο. Η εξαγωγή χαλκού από αυτά τα προϊόντα είναι πιο δύσκολη, καθώς απαιτεί ειδικές τεχνολογίες για την απομόνωση του μετάλλου από άλλα υλικά. Οι νέες τεχνολογίες, όπως η πυρομεταλλουργία και η υδρομεταλλουργία, επιτρέπουν την ανάκτηση χαλκού από αυτά τα σύνθετα απόβλητα με πιο αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο.

Η χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ανακύκλωση είναι μια άλλη τάση που επηρεάζει την ανακύκλωση χαλκού. Η παραδοσιακή διαδικασία ανακύκλωσης του χαλκού απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας, κυρίως λόγω της τήξης του χαλκού σε υψηλές θερμοκρασίες. Όμως, πολλές σύγχρονες μονάδες ανακύκλωσης υιοθετούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, για την τροφοδοσία των εγκαταστάσεων τους. Αυτό όχι μόνο μειώνει το ενεργειακό αποτύπωμα της διαδικασίας, αλλά και μειώνει τις εκπομπές CO_2 που συνδέονται με την ανακύκλωση του χαλκού, κάνοντάς την πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον.

Η κυκλική οικονομία είναι μια από τις βασικές αρχές που καθοδηγούν τις σύγχρονες πρακτικές ανακύκλωσης χαλκού. Η ανακύκλωση του χαλκού εντάσσεται πλήρως στην κυκλική οικονομία, όπου τα υλικά παραμένουν στον παραγωγικό κύκλο για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο. Σε αυτή την προσέγγιση, ο χαλκός θεωρείται ένας πόρος που μπορεί να επαναχρησιμοποιείται συνεχώς χωρίς την ανάγκη για εξόρυξη νέων πόρων, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από πρώτες ύλες και μειώνοντας

τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την εξόρυξη και την επεξεργασία νέων μετάλλων.

Ένα άλλο σημαντικό βήμα είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών για την αποθήκευση και την διαχείριση των αποβλήτων που περιέχουν χαλκό. Η σωστή διαχείριση των αποβλήτων χαλκού και των παραπροϊόντων της διαδικασίας ανακύκλωσης είναι κρίσιμη για την αποφυγή της μόλυνσης του περιβάλλοντος και την ελαχιστοποίηση της σπατάλης του μετάλλου. Ειδικές μέθοδοι αποθήκευσης και επεξεργασίας, όπως η ανακύκλωση της κόκκινης λάσπης (που προέρχεται από την επεξεργασία του βωξίτη) ή η απόθεση των τοξικών ουσιών σε κατάλληλους χώρους, είναι κρίσιμες για τη διαχείριση των αποβλήτων και τη διατήρηση των φυσικών πόρων.

Τέλος, η εκπαίδευση και η ευαισθητοποίηση των επιχειρήσεων και του κοινού για την ανακύκλωση χαλκού είναι ζωτικής σημασίας. Καθώς η ζήτηση για ανακυκλωμένα υλικά αυξάνεται, είναι απαραίτητο να ενισχυθεί η κατανόηση της σημασίας της ανακύκλωσης χαλκού, τόσο σε επίπεδο βιομηχανίας όσο και στο επίπεδο των καταναλωτών. Η εκπαίδευση και η ενημέρωση για την αξία του χαλκού ως ανακυκλώσιμο υλικό βοηθούν στην ενίσχυση της διαδικασίας συλλογής, διαλογής και επεξεργασίας των αποβλήτων, μειώνοντας έτσι την περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Συνολικά, οι σύγχρονες τάσεις στην ανακύκλωση χαλκού επικεντρώνονται στη βελτίωση της αποδοτικότητας της διαδικασίας, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας. Οι καινοτόμες τεχνολογίες και οι πιο βιώσιμες πρακτικές ανακύκλωσης αναδεικνύουν τον χαλκό ως ένα πολύτιμο υλικό που μπορεί να συνεχίσει να προσφέρει στην κοινωνία και την οικονομία για πολλές γενιές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΓΟΡΑ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ & ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

5.1 Εισαγωγή

Τα προηγούμενα κεφάλαια επικεντρώθηκαν στις θεμελιώδεις αρχές της ανακύκλωσης και στις ειδικές τεχνικές διεργασίες για τον χάλυβα, το αλουμίνιο και τον χαλκό. Ωστόσο, η διαδικασία της ανακύκλωσης μετάλλων εντάσσεται σε ένα

ευρύτερο οικονομικό, τεχνολογικό και θεσμικό πλαίσιο, η κατανόηση του οποίου είναι απαραίτητη για μια ολοκληρωμένη εικόνα. Το παρόν κεφάλαιο έρχεται να συμπληρώσει την ανάλυση, διερευνώντας τρεις κρίσιμες διαστάσεις που δεν καλύφθηκαν εκτενώς: α) την αγορά των ανακυκλωμένων μετάλλων, συμπεριλαμβανομένων των τιμών και των γενικότερων τάσεων, β) τις εξειδικευμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης που εφαρμόζονται σε σημαντικές πηγές αποβλήτων, όπως τα οχήματα τέλους κύκλου ζωής (ΟΤΚΖ), και γ) τα ποσοτικά δεδομένα ανακύκλωσης και την υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση, συνδέοντας την ανακύκλωση με την ευρύτερη στρατηγική της κυκλικής οικονομίας.

5.2 Η Αγορά Ανακυκλωμένων Μετάλλων

Η ανακύκλωση μετάλλων υπερβαίνει την περιβαλλοντική διάσταση, αποτελώντας μια διεθνώς αναγνωρισμένη οικονομική δραστηριότητα. Η αγορά των δευτερογενών μετάλλων, γνωστή και ως αγορά σκραπ, είναι εγγενώς δυναμική, με τις τιμές και τις εμπορικές ροές να επηρεάζονται από ένα σύμπλεγμα παραγόντων.

5.2.1 Τιμές Ανακυκλωμένων Μετάλλων στην Ελλάδα

Η τιμολόγηση του σκραπ μετάλλων στην ελληνική αγορά ακολουθεί τις διεθνείς τάσεις, αλλά επηρεάζεται και από τοπικούς παράγοντες, όπως το κόστος συλλογής και επεξεργασίας, και την ποιότητα του υλικού. Οι τιμές παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις, καθιστώντας απαραίτητη την παρακολούθηση των ενδεικτικών τιμοκαταλόγων που δημοσιεύουν οι εταιρείες του κλάδου. Για παράδειγμα, τον Μάιο του 2025, ενδεικτικές τιμές αγοράς από ελληνικές εταιρείες ήταν οι εξής (ΟΙΚΟΚΥΚΛΙΟΣ Α.Β.Ε.Ε, ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΜΕΝΙΔΙΟΥ, Scrapmetal):

- Χαλκός Α' (καθαρός): περίπου €6,00 - €6,65 /κιλό
- Αλουμίνιο Προφίλ: περίπου €1,10 - €1,40 /κιλό
- Σίδηρος/Χάλυβας (σκραπ): περίπου €0,11 - €0,14 /κιλό
- Ορείχαλκος: περίπου €3,20 - €3,60 /κιλό

Ο Οδηγός του ΥΠΕΝ (Φραντζής και Συνεργάτες και BlackForest Solutions, 2020) ανέφερε ενδεικτική τιμή €500/τόνο για το αλουμίνιο, πιθανώς από δημοπρασίες ανακυκλώσιμων υλικών δήμων κατά την περίοδο 2017-2019. Η αξία αυτή

υπογραμμίζει τη σημασία της ποιότητας, καθώς οι προσμίξεις μειώνουν την εμπορευσιμότητα (Φραντζής και Συνεργάτες και BlackForest Solutions, 2020).

5.2.2 Τάσεις και Προκλήσεις στην Ευρωπαϊκή Αγορά

Η ευρωπαϊκή βιομηχανία ανακύκλωσης μετάλλων αποτελεί πυλώνα για την επίτευξη των στόχων της ΕΕ για το κλίμα, την κυκλική οικονομία και τη στρατηγική αυτονομία (EuRIC, 2025a). Η υποκατάσταση πρωτογενών πρώτων υλών με ανακυκλωμένα μέταλλα οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση εκπομπών CO2 (EuRIC, 2020b). Παρά τη στρατηγική της σημασία, η ευρωπαϊκή αγορά σκραπ αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις (EuRIC, 2025a).

Η μειωμένη βιομηχανική δραστηριότητα, το υψηλό ενεργειακό κόστος και οι γεωπολιτικές αβεβαιότητες έχουν οδηγήσει σε περιορισμένη εγχώρια ζήτηση για ανακυκλωμένα μέταλλα (EuRIC, 2025a). Αυτή η κατάσταση δυσχεραίνει τις απαραίτητες επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες ανακύκλωσης (EuRIC, 2025a). Πρόσθετα εμπόδια αποτελούν οι χρονοβόρες αδειοδοτικές διαδικασίες και η δυσκολία πρόσβασης σε χρηματοδότηση και ασφάλιση (EuRIC, 2025a).

Η ΕΕ παράγει περισσότερο σκραπ χάλυβα από όσο καταναλώνει, καθιστώντας τις εξαγωγές απαραίτητες για την ισορροπία της αγοράς (EuRIC, 2025a). Ωστόσο, οι επερχόμενοι περιορισμοί στις εξαγωγές μέσω του νέου Κανονισμού Μεταφοράς Αποβλήτων (WSR) δημιουργούν ανησυχίες για τη βιωσιμότητα του κλάδου (EuRIC, 2025a). Οι φορείς της βιομηχανίας ζητούν πολιτικές που θα ενισχύσουν την εσωτερική αγορά, όπως η θέσπιση στόχων ανακυκλωμένου περιεχομένου, και θα διασφαλίσουν ένα σταθερό και προβλέψιμο πλαίσιο για το διεθνές εμπόριο (EuRIC, 2025a).

5.3 Τεχνολογίες Ανακύκλωσης Μετάλλων από Οχήματα Τέλους Κύκλου Ζωής (ΟΤΚΖ)

Τα ΟΤΚΖ αποτελούν μια πλούσια πηγή δευτερογενών μετάλλων, κυρίως χάλυβα και αλουμινίου (Muchová and Eder, 2010). Η αποτελεσματική ανακύκλωσή τους είναι κρίσιμη, αλλά παρουσιάζει ιδιαίτερες τεχνολογικές προκλήσεις.

5.3.1 Η Διαδικασία Ανακύκλωσης ΟΤΚΖ

Η διαχείριση των ΟΤΚΖ περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια επεξεργασίας (Negri and Bieker, 2025; Muchová and Eder, 2010):

1. **Απορρύπανση:** Αφαίρεση υγρών (καύσιμα, λάδια, ψυκτικά κ.ά.), μπαταρίας και επικίνδυνων εξαρτημάτων.
2. **Διάλυση (Dismantling):** Αποσυναρμολόγηση και αφαίρεση επαναχρησιμοποιήσιμων ανταλλακτικών και υλικών που ανακυκλώνονται χωριστά (π.χ., ελαστικά, καταλύτης).
3. **Τεμαχισμός (Shredding):** Το υπόλοιπο σώμα ("hulk") τεμαχίζεται μηχανικά σε μικρά κομμάτια.
4. **Διαχωρισμός Υλικών:** Εφαρμογή τεχνικών όπως ο μαγνητικός διαχωρισμός (για χάλυβα) και τα δινορρεύματα ή ο διαχωρισμός βάσει πυκνότητας (για αλουμίνιο, χαλκό κ.ά.).
5. **Υπόλειμμα Τεμαχισμού (ASR):** Το εναπομείναν κλάσμα, κυρίως πλαστικά, λάστιχα, υφάσματα κ.λπ., που αποτελεί περίπου το 20-25% του βάρους (Muchová and Eder, 2010).

5.3.2 Προκλήσεις στην Ανακύκλωση Χάλυβα από ΟΤΚΖ

Η βασική πρόκληση είναι η διατήρηση της ποιότητας του χάλυβα. Κατά τον τεμαχισμό, το σκραπ χάλυβα μολύνεται από χαλκό, κυρίως από τα καλώδια που παραμένουν στο όχημα (Negri and Bieker, 2025). Ο χαλκός είναι δύσκολο να αφαιρεθεί κατά την τήξη και η παρουσία του ακόμη και σε μικρές ποσότητες (>0.1%) υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα, καθιστώντας τον ακατάλληλο για απαιτητικές εφαρμογές όπως η αυτοκινητοβιομηχανία (Negri and Bieker, 2025). Αυτό οδηγεί σε "downcycling" του υλικού σε εφαρμογές χαμηλότερης αξίας και ποιότητας (Negri and Bieker, 2025). Η συσσώρευση χαλκού ("tramp element") στους κύκλους ανακύκλωσης αποτελεί μακροπρόθεσμο κίνδυνο για τη βιωσιμότητα της ανακύκλωσης χάλυβα (Negri and Bieker, 2025).

5.3.3 Προηγμένες Τεχνικές Ανάκτησης και Σχεδιασμός

Η αντιμετώπιση του προβλήματος της μόλυνσης με χαλκό απαιτεί καινοτόμες προσεγγίσεις (Negri and Bieker, 2025):

- **Σχεδιασμός για Αποσυναρμολόγηση:** Ο σχεδιασμός των οχημάτων με τρόπο που να διευκολύνει την αφαίρεση των καλωδιώσεων είναι ουσιώδης (Negri and Bieker, 2025).
- **Βελτιωμένη Αποσυναρμολόγηση (Pre-shredding):** Η εντατικότερη χειρωνακτική ή ρομποτική αφαίρεση των καλωδίων πριν τον τεμαχισμό μπορεί να μειώσει σημαντικά την περιεκτικότητα σε χαλκό (<0.1%), αν και ενέχει αυξημένο κόστος (Negri and Bieker, 2025).
- **Προηγμένος Διαχωρισμός (Post-shredding):** Η χρήση εξελιγμένων τεχνολογιών διαχωρισμού μετά τον τεμαχισμό (π.χ. οπτικοί αισθητήρες, τεχνητή νοημοσύνη) μπορεί να επιτύχει υψηλή καθαρότητα στον διαχωρισμό χάλυβα-χαλκού (Negri and Bieker, 2025).

Αυτές οι τεχνικές είναι απαραίτητες για τη δημιουργία ενός κλειστού κύκλου ανακύκλωσης για τον χάλυβα αυτοκινήτων.

5.4 Ποσοτικά Στοιχεία και η Κατάσταση στην Ελλάδα και την Ευρώπη

Τα στατιστικά δεδομένα είναι θεμελιώδη για την παρακολούθηση της προόδου της ανακύκλωσης, αν και η ερμηνεία τους απαιτεί προσοχή λόγω μεθοδολογικών διαφορών.

5.4.1 Ποσοστά Ανακύκλωσης στην Ευρώπη

Η ΕΕ στοχεύει σε υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης ΑΣΑ (65% έως το 2035) και συσκευασιών (European Commission, 2019; European Commission, 2019). Μελέτες που προσαρμόζουν τα δεδομένα στη νέα, αυστηρότερη μεθοδολογία της ΕΕ δείχνουν ότι χώρες όπως η Αυστρία και η Γερμανία πλησιάζουν ή ξεπερνούν το 55-60% στην ανακύκλωση ΑΣΑ (Eunomia Research & Consulting, 2023). Τα μέταλλα γενικά έχουν υψηλά ποσοστά ανάκτησης: στην ΕΕ, περίπου το 56% του χάλυβα παράγεται από

σκραπ, το 44% της ζήτησης χαλκού καλύπτεται από ανακύκλωση, και το 69% του αλουμινίου στο τέλος ζωής ανακυκλώνεται (EuRIC, 2020b).

5.4.2 Η Ανακύκλωση Μετάλλων στην Ελλάδα

Η Ελλάδα βασίζεται στα ΣΣΕΔ, κυρίως στο σύστημα των μπλε κάδων της ΕΕΑΑ, για τη συλλογή ανακυκλώσιμων συσκευασιών (Φραντζής και Συνεργάτες και BlackForest Solutions, 2020). Οι κύριες προκλήσεις είναι η ποιότητα των υλικών που συλλέγονται (υψηλές προσμίξεις) και η ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων χωριστής συλλογής στην πηγή για κάθε υλικό (Φραντζής και Συνεργάτες και BlackForest Solutions, 2020). Η χώρα υστερεί στην επίτευξη των ευρωπαϊκών στόχων, και η βελτίωση της ανακύκλωσης αποτελεί προτεραιότητα του ΕΣΔΑ και των ΠΕΣΔΑ (ΥΠΕΝ, 2019). Ο ΕΟΑΝ είναι ο αρμόδιος εθνικός φορέας εποπτείας (Φραντζής και Συνεργάτες και BlackForest Solutions, 2020).

5.4.3 Η Σημασία της Ανακύκλωσης Μετάλλων για την Κυκλική Οικονομία

Η ανακύκλωση μετάλλων ενσαρκώνει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας (EuRIC, 2025a). Η δυνατότητα σχεδόν αέναης ανακύκλωσής τους χωρίς απώλεια ποιότητας (EuRIC, 2020b) προσφέρει τεράστια οφέλη:

- **Περιβαλλοντικά:** Εξοικονόμηση φυσικών πόρων, δραστική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (έως 95% για το αλουμίνιο) και των εκπομπών CO2 (έως 92% για το αλουμίνιο), και περιορισμός της ρύπανσης (EuRIC, 2020b).
- **Οικονομικά:** Μείωση κόστους παραγωγής, δημιουργία θέσεων εργασίας, ενίσχυση της βιομηχανικής ανταγωνιστικότητας (EuRIC, 2020b).
- **Στρατηγικά:** Μείωση της εξάρτησης της Ευρώπης από εισαγωγές κρίσιμων πρώτων υλών (EuRIC, 2025a).

Η πλήρης αξιοποίηση αυτών των οφελών απαιτεί συντονισμένες πολιτικές για την ενίσχυση της συλλογής, της ποιότητας και της ζήτησης για δευτερογενή μέταλλα (EuRIC, 2025a).

5.5 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο συμπλήρωσε την ανάλυση της ανακύκλωσης μετάλλων, εξετάζοντας την αγορά, τις τεχνολογίες ανακύκλωσης ΟΤΚΖ και το ευρύτερο πλαίσιο στην Ελλάδα και την Ευρώπη. Αναδείχθηκαν οι οικονομικές προκλήσεις και οι τάσεις στην ευρωπαϊκή αγορά σκραπ, οι τεχνολογικές δυσκολίες αλλά και οι λύσεις για την ποιοτική ανακύκλωση μετάλλων από οχήματα, καθώς και η υστέρηση της Ελλάδας στην επίτευξη των στόχων ανακύκλωσης σε σύγκριση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Η ανακύκλωση μετάλλων, με τα σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά της οφέλη, αποτελεί κεντρικό στοιχείο της μετάβασης προς την κυκλική οικονομία, απαιτώντας όμως συνεχή βελτίωση των τεχνολογιών, των υποδομών και των πολιτικών πλαισίων. Η κατανόηση αυτών των πτυχών είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική προώθηση και εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης μετάλλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχείρησε μια ολοκληρωμένη διερεύνηση της ανακύκλωσης τριών βασικών μετάλλων του χάλυβα, του αλουμινίου και του χαλκού. Στόχος ήταν όχι μόνο η παρουσίαση των τεχνικών διαδικασιών και των ιδιοτήτων που καθιστούν την ανακύκλωση αυτών των μετάλλων εφικτή και επιθυμητή, αλλά και η ενσωμάτωση της ανάλυσης στο ευρύτερο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, της αγοράς, των εξειδικευμένων τεχνολογιών (όπως στα ΟΤΚΖ) και της υφιστάμενης κατάστασης σε Ελλάδα και Ευρώπη. Το κεφάλαιο αυτό συνοψίζει τα κύρια ευρήματα της εργασίας και παρουσιάζει τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν.

6.2 Σύνοψη Κύριων Ευρημάτων

Η ανάλυση στα προηγούμενα κεφάλαια ανέδειξε μια σειρά από σημαντικά σημεία:

- **Γενικό Πλαίσιο (Κεφ. 1):** Η ανακύκλωση, ως διαδικασία μετατροπής αποβλήτων σε νέα χρήσιμα υλικά, αποτελεί κεντρικό πυλώνα της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης. Η ιστορική της εξέλιξη δείχνει μια αυξανόμενη σημασία, η οποία ενισχύεται από το σύγχρονο θεσμικό πλαίσιο σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Η ανακύκλωση μετάλλων, ειδικότερα, προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά (εξοικονόμηση πόρων, ενέργειας, μείωση ρύπανσης) και οικονομικά (μείωση κόστους, δημιουργία θέσεων εργασίας) οφέλη, ενώ η δυνατότητα σχεδόν αέναης ανακύκλωσής τους χωρίς υποβάθμιση ποιότητας τα καθιστά ιδανικά για μοντέλα κλειστού κύκλου.
- **Ανακύκλωση Χάλυβα (Κεφ. 2):** Ο χάλυβας, με την τεράστια ποικιλία κραμάτων και εφαρμογών του, είναι ένα από τα πιο ανακυκλώσιμα υλικά. Η διαδικασία ανακύκλωσής του (συλλογή, διαλογή, τήξη) είναι καλά εδραιωμένη και οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας (έως 75%) και πρώτων υλών. Νέες τάσεις εστιάζουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (π.χ. ΑΠΕ), στην αύξηση της ποιότητας του ανακυκλωμένου προϊόντος μέσω προηγμένων τεχνικών διαλογής, στην ψηφιοποίηση της διαδικασίας και στην ανάκτηση πολύτιμων κραματικών στοιχείων. Ο άτυπος τομέας διαδραματίζει σημαντικό,

αν και προβληματικό από πλευράς ρύθμισης και ασφάλειας, ρόλο στη συλλογή σκραπ, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες οικονομίες.

- **Ανακύκλωση Αλουμινίου (Κεφ. 3):** Η πρωτογενής παραγωγή αλουμινίου από βωξίτη (μέθοδος Bayer και ηλεκτρόλυση) είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα και παράγει σημαντικά απόβλητα (κόκκινη λάσπη, εκπομπές CO2 και φθοριούχων αερίων). Αντίθετα, η ανακύκλωση αλουμινίου απαιτεί μόλις το 5-10% της ενέργειας της πρωτογενούς παραγωγής, καθιστώντας την περιβαλλοντικά και οικονομικά επιτακτική. Οι τεχνολογίες εστιάζουν στην ανάκτηση υλικών από τα απόβλητα παραγωγής (π.χ. χρήση κόκκινης λάσπης σε δομικά υλικά), στην ανάκτηση φθοριούχων αερίων, στην ανάκτηση θερμότητας και στη βελτίωση της διαλογής και καθαρισμού του σκραπ.
- **Ανακύκλωση Χαλκού (Κεφ. 4):** Ο χαλκός, με την εξαιρετική του αγωγιμότητα και αντοχή στη διάβρωση, είναι πολύτιμος σε πλήθος εφαρμογών (ηλεκτρολογικές, κατασκευές, αυτοκινητοβιομηχανία, κ.ά.). Η ανακύκλωσή του προσφέρει τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας (85-90%) και πόρων. Οι σύγχρονες πρακτικές επικεντρώνονται στη βελτίωση της ποιότητας του ανακυκλωμένου χαλκού, στην ανάκτηση από σύνθετα απόβλητα (όπως ηλεκτρονικές συσκευές - e-waste) μέσω πυρο- και υδρο-μεταλλουργίας, και στη χρήση ΑΠΕ στη διαδικασία ανακύκλωσης.
- **Αγορά, Τεχνολογίες ΟΤΚΖ & Πλαίσιο (Κεφ. 5):** Η αγορά σκραπ μετάλλων στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις τιμών, ενώ η ευρωπαϊκή αγορά αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως η χαμηλή εγχώρια ζήτηση και το υψηλό κόστος ενέργειας. Η ανακύκλωση ΟΤΚΖ είναι κρίσιμη, αλλά η μόλυνση του χάλυβα με χαλκό αποτελεί σημαντικό εμπόδιο, απαιτώντας βελτιωμένες τεχνικές διαλογής και σχεδιασμό για αποσυναρμολόγηση. Η Ελλάδα υστερεί στην επίτευξη των ευρωπαϊκών στόχων ανακύκλωσης, με κύριες προκλήσεις την ποιότητα της συλλογής στους μπλε κάδους και την ανάγκη ενίσχυσης της χωριστής συλλογής στην πηγή. Η ανακύκλωση μετάλλων είναι αναπόσπαστο κομμάτι της στρατηγικής της ΕΕ για την κυκλική οικονομία και τη στρατηγική αυτονομία.

6.3 Γενικά Συμπεράσματα

Από τη συνολική μελέτη προκύπτει ότι η ανακύκλωση του χάλυβα, του αλουμινίου και του χαλκού αποτελεί μια διαδικασία θεμελιώδους σημασίας για τη σύγχρονη κοινωνία, προσφέροντας πολλαπλά οφέλη που ευθυγραμμίζονται πλήρως με τις αρχές της βιωσιμότητας και της κυκλικής οικονομίας. Η δυνατότητα σχεδόν αέναης ανακύκλωσης αυτών των μετάλλων χωρίς ουσιαστική απώλεια ποιότητας τα καθιστά πολύτιμους δευτερογενείς πόρους, ικανούς να μειώσουν την εξάρτηση από την εξόρυξη πρωτογενών υλών, να εξοικονομήσουν σημαντικά ποσά ενέργειας και να περιορίσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της ανακύκλωσης είναι συνεχής, με έμφαση στη βελτίωση της αποδοτικότητας των διεργασιών, την αύξηση της καθαρότητας των ανακτώμενων υλικών και την ανάκτηση μετάλλων από ολοένα και πιο σύνθετα ρεύματα αποβλήτων, όπως τα ηλεκτρονικά απόβλητα και τα οχήματα τέλους κύκλου ζωής. Ωστόσο, παραμένουν σημαντικές προκλήσεις, όπως η διαχείριση των προσμίξεων (π.χ. χαλκός στον χάλυβα από ΟΤΚΖ), η διαχείριση ειδικών αποβλήτων (π.χ. κόκκινη λάσπη από την παραγωγή αλουμινίου) και η διασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας των διαδικασιών, ειδικά υπό το πρίσμα της αστάθειας των αγορών και του αυξανόμενου ενεργειακού κόστους.

Η αποτελεσματική ανακύκλωση μετάλλων δεν είναι μόνο ζήτημα τεχνολογίας, αλλά και οργάνωσης, πολιτικής και κοινωνικής ευαισθητοποίησης. Η ύπαρξη ενός σαφούς και σταθερού θεσμικού πλαισίου, η ανάπτυξη αποδοτικών συστημάτων συλλογής και διαλογής στην πηγή, η δημιουργία αγορών για τα δευτερογενή υλικά και η ενεργός συμμετοχή των πολιτών και των επιχειρήσεων είναι εξίσου κρίσιμοι παράγοντες. Η κατάσταση στην Ελλάδα, αν και παρουσιάζει σημάδια βελτίωσης, υπογραμμίζει την ανάγκη για εντατικοποίηση των προσπαθειών σε όλα τα επίπεδα – από τη βελτίωση των υποδομών και την εφαρμογή οικονομικών κινήτρων μέχρι την ενίσχυση της ενημέρωσης και της περιβαλλοντικής συνείδησης.

6.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε πεδία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Ανάλυση κόστους-οφέλους και τεχνικο-οικονομική αξιολόγηση των προηγμένων τεχνολογιών διαχωρισμού μετάλλων από ΟΤΚΖ στο ελληνικό πλαίσιο.
- Διερεύνηση των μακροπρόθεσμων τάσεων της αγοράς σκραπ στην Ευρώπη και την Ελλάδα και των επιπτώσεων των διεθνών εμπορικών ροών.
- Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των υφιστάμενων και προτεινόμενων πολιτικών και οικονομικών εργαλείων για την προώθηση της ανακύκλωσης μετάλλων στην Ελλάδα.
- Μελέτη βέλτιστων πρακτικών για την ενσωμάτωση του άτυπου τομέα συλλογής σκραπ στο επίσημο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων.

6.5 Τελικές Παρατηρήσεις

Η ανακύκλωση του χάλυβα, του αλουμινίου και του χαλκού είναι κάτι περισσότερο από μια απλή διαχείριση αποβλήτων αποτελεί στρατηγική επιλογή για την προστασία του περιβάλλοντος, την ορθολογική χρήση των πόρων και την οικοδόμηση μιας βιώσιμης και ανθεκτικής οικονομίας. Η συνεχής επένδυση στην έρευνα, την τεχνολογία, τις υποδομές και την ενημέρωση αποτελεί προϋπόθεση για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού της ανακύκλωσης μετάλλων προς όφελος της κοινωνίας και του πλανήτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aluminum Association. (1984). *Aluminum: properties and physical metallurgy*. ASM international.

Ayres, R. U. (1997). Metals recycling: economic and environmental implications. *Resources, conservation and recycling*, *21*(3), 145-173.

BrbootI, M. M., Abid, B. A., & Al-Shu Aluminum Association. (1984). *Aluminum: properties and physical metallurgy*. ASM international.

Callister, W. & Rethwisch, D. (2010). *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 8th Edition.

Das, S. K. (2006). Designing aluminium alloys for a recycling friendly world. In *Materials Science Forum* (Vol. 519, pp. 1239-1244). Trans Tech Publications Ltd.

Das, S., & Yin, W. (2007). Trends in the global aluminum fabrication industry. *Jom, 59*(2), 83-87.

Donoghue, A. M., Frisch, N., & Olney, D. (2014). Bauxite mining and alumina refining: process description and occupational health risks. *Journal of occupational and environmental medicine*, *56*, S12-S17.

Ezeah, C., Fazakerley, J. A., & Roberts, C. L. (2013). Emerging trends in informal sector recycling in developing and transition countries. *Waste management*, *33*(11), 2509-2519.

Fiore, S., Zanetti, M. C., & Ruffino, B. (2005). Waste characterization and recycle in an aluminium foundry. *Resources, conservation and recycling*, *45*(1), 48-59.

Fogagnolo, J. B., Ruiz-Navas, E. M., Simón, M. A., & Martinez, M. A. (2003). Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, *143*, 792-795.

Georgantzia, E., Gkantou, M., & Kamaris, G. S. (2021). Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*, *227*, 111372.

Kashyap, P., & Visvanathan, C. (2014). Formalization of informal recycling in low-income countries. *Municipal solid waste management in Asia and the Pacific Islands: challenges and strategic solutions*, 41-60.

Krauss, G. (2015). *Steels: processing, structure, and performance*. Asm International.

Martínez Leal, J., Pompidou, S., Charbuillet, C., & Perry, N. (2020). Design for and from recycling: A circular ecodesign approach to improve the circular economy. *Sustainability*, *12*(23), 9861.

Mondolfo, L. F. (2013). *Aluminum alloys: structure and properties*. Elsevier.

Nawaz, M., Yousafzai, M. T., Khan, S., Ahmad, W., Salman, M., Han, H., ... & Vega-Muñoz, A. (2021). Assessing the formal and informal waste recycling business processes through a stakeholders lens in Pakistan. *Sustainability*, *13*(21), 11717.

Power, G., Grafe, M., Klauber, C. (2011). Bauxite redidue issues: I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy*, 108, 33-45. Elsevier

Ragossnig, A. M., & Schneider, D. R. (2019). Circular economy, recycling and end-of-waste. *Waste Management & Research*, *37*(2), 109-111.

Reck, B. K., & Graedel, T. E. (2012). Challenges in metal recycling. *Science*, *337*(6095), 690-695.

Schmitz, C. (Ed.). (2006). *Handbook of aluminium recycling*. Vulkan-Verlag GmbH.

Sidique, S. F., Joshi, S. V., & Lupi, F. (2010). Factors influencing the rate of recycling: An analysis of Minnesota counties. *Resources, Conservation and Recycling*, *54*(4), 242-249.

Sun, Z., Xiao, Y., Agterhuis, H., Sietsma, J., & Yang, Y. (2016). Recycling of metals from urban mines–a strategic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2977-2987.

Suthar, S., Rayal, P., & Ahada, C. P. (2016). Role of different stakeholders in trading of reusable/recyclable urban solid waste materials: A case study. *Sustainable Cities and Society*, *22*, 104-115.

Suttibak, S., & Nitivattananon, V. (2008). Assessment of factors influencing the performance of solid waste recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling*, *53*(1-2), 45-56.

Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes* (Vol. 1). CRC press.

Uddin, A., Ali, Y., Sabir, M., Petrillo, A., & De Felice, F. (2023). *Circular economy and its implementation in cement industry: A case point in Pakistan. Science of the Total Environment,* 898, 165605.

Velenturf, A. P., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 1437-1457.

Waite, R. (2013). *Household waste recycling*. Routledge.

Τσώκου, Π. (2019). *Διπλωματική Εργασία: Διαχείριση αποβλήτων στη βιομηχανία παραγωγής πρωτογενούς Αλουμινίου και Προοπτικές Αξιοποίησης*. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο-Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας-Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Διαχείριση Αποβλήτων».

Χρυσουλάκης, Γ. & Παντελής, Δ. (1996). *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

EuRIC (European Recycling Industries' Confederation). (2025a). *EU Recyclers' Circular Economy Action Plan for Recycled Metals*. Brussels: EuRIC. [Online]
Available at: https://euric.org/images/Reports-Studies/Print%20Version%20-%20EuRICs%20Circular%20Economy%20Action%20Plan%20for%20Recycled%20Metals.pdf
[Accessed 5 May 2025].

EuRIC (European Recycling Industries' Confederation). (n.d.). *Metal Recycling Factsheet: Recycling – Bridging Circular Economy & Climate Policy*. Brussels: EuRIC / European Circular Economy Stakeholder Platform. [Online]
Available at:
https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/euric_metal_recycling_factsheet.pdf
[Accessed 5 May 2025].

Eunomia Research & Consulting Ltd. (2023). *Municipal Solid Waste Recycling Rates Study: Final Report, November 2023*. Prepared for the Irish Waste Management Association (IWMA). Bristol: Eunomia Research & Consulting. [Online]
Available at: https://iwma.ie/wp-content/uploads/2024/03/MSW-Recycling-Rates-Study-MASTER_v6.pdf
[Accessed 5 May 2025].

Muchová, L. and Eder, P. (2010). *End-of-waste Criteria for Aluminium and Aluminium Alloy Scrap: Technical Proposals*. EUR 24396 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, for JRC-IPTS. [Online]
Available at:
https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC58527/jrc58527.pdf
[Accessed 5 May 2025].

Negri, M. and Bieker, G. (2025). *Closing the Loop: Improving Automotive Steel Recycling for a Circular Economy*. Policy Brief (ID 305). Washington DC: International Council on Clean Transportation (ICCT). [Online]
Available at: https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/03/ID-305-%E2%80%93-Recycled-steel_brief_final.pdf
[Accessed 5 May 2025].

Φραντζής, Ι., Συνεργάτες Ε.Π.Ε. και BlackForest Solutions GmbH. (2020). *Οδηγός για τη χωριστή συλλογή αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα: Τελική Έκθεση*. Έργο GIZ για το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. [Online]
Available at: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/09/Final-Report_A1.1_Separate_Collection_20200624_final_GR.pdf
[Ημερομηνία Πρόσβασης: 5 Μαΐου 2025].

Oikokiklios. (2025). *Τιμές Αγοράς Σκραπ*. [Online] Available at: https://oikokiklios.gr/scrap-prices/agora-scrap-athina/ [Accessed 5 May 2025].

Scrapmetal.gr. (2025). *Τιμές Σκραπ*. [Online] Available at: https://scrapmetal.gr/ [Accessed 5 May 2025].

Skrap.gr. (2025). *ΤΙΜΕΣ*. [Online] Available at: https://www.skrap.gr/times-scrap/
[Accessed 5 May 2025].