

Θερμοχημικές συγκολλήσεις και ηλεκτρικό τόξο συγκολλήσεων

ΔΙΑΛΕΞΗ 2

ΜΕΡΟΣ Α

ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Βέλτιστες συνθήκες υλοποίησης συγκολλήσεων τήξης

- ❑ Πρόσδοση ικανής θερμότητας – αποφυγή ελλιπούς τήξης
- ❑ Καθαρή επιφάνεια μητρικού υλικού (καθαρισμός οξειδίων και άλλων ακαθαρσιών)
- ❑ Αποφυγή επαναδημιουργίας οξειδίων και αλλοιωμένων στρωμάτων κατά τη συγκόλληση
 - Αδρανή αέρια
 - Συγκόλληση σε κενό αέρα
 - Χρήση ηλεκτροδίων με επικάλυψη (σχηματισμός σκωρίας στην επιφάνεια)
 - Το ίδιο το πλάσμα (για μικρές συγκεντρώσεις οξυγόνου)

Θερμοχημικές συγκολλήσεις

- ❑ Με καύσιμο αέριο οξυγόνο ή με θερμότητα
- ❑ Παροχή θερμότητας μέσω εξώθερμων χημικών αντιδράσεων
- ❑ Δεν απαιτούν επιβαλλόμενη πίεση
- ❑ Χρήση ΜΚΕ για τον έλεγχο του μετάλλου συγκόλλησης

Συγκόλληση αερίου με καύσιμο οξυγόνο

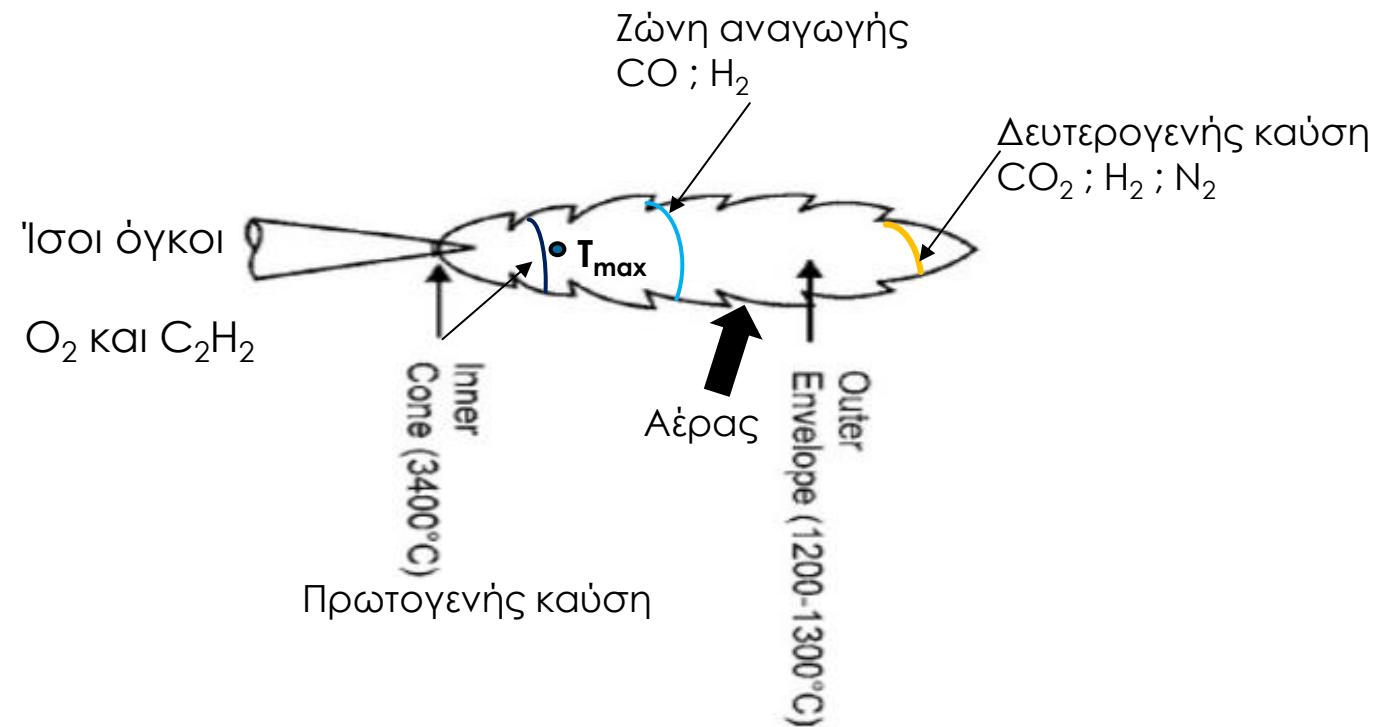
- ❑ Κάθε μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιεί ως μέσο πρόσδοσης θερμότητας κάποιο αέριο καύσιμο με οξυγόνο
- ❑ Η φλόγα από το ακροφύσιο προκαλεί τήξη του μητρικού και το πληρωτικού υλικού (αν υπάρχει)
- ❑ Το καύσιμο αναμιγνύεται σε κατάλληλη αναλογία ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκόλλησης

Συγκόλληση αερίου με καύσιμο οξυγόνο – χαρακτηριστικά καυσίμων

Αέριο	Ακετυλένιο	Προπάνιο	Μεθάνιο	Υδρογόνο
Χημικός τύπος	C_2H_2	C_3H_8	CH_4	H_2
Σχετικό ειδικό βάρος γ_s (16 °C)	0.906	1.52	0.62	0.07
Όγκος / βάρος γ^{-1} (m ³ /kg)	0.91	0.54	1.44	11.77
Θερμοκρασία φλόγας (°C)	3087	2526	2538	2660
Θερμογόνος δύναμη (MJ/ m ³)	55	104	37	12
Ταχύτητα καύσης (m/s)	7.9	3.9	5.5	11.6
Ροή θερμικής ενέργειας* (J s /m ²)	434.5	405.6	203.5	139.2

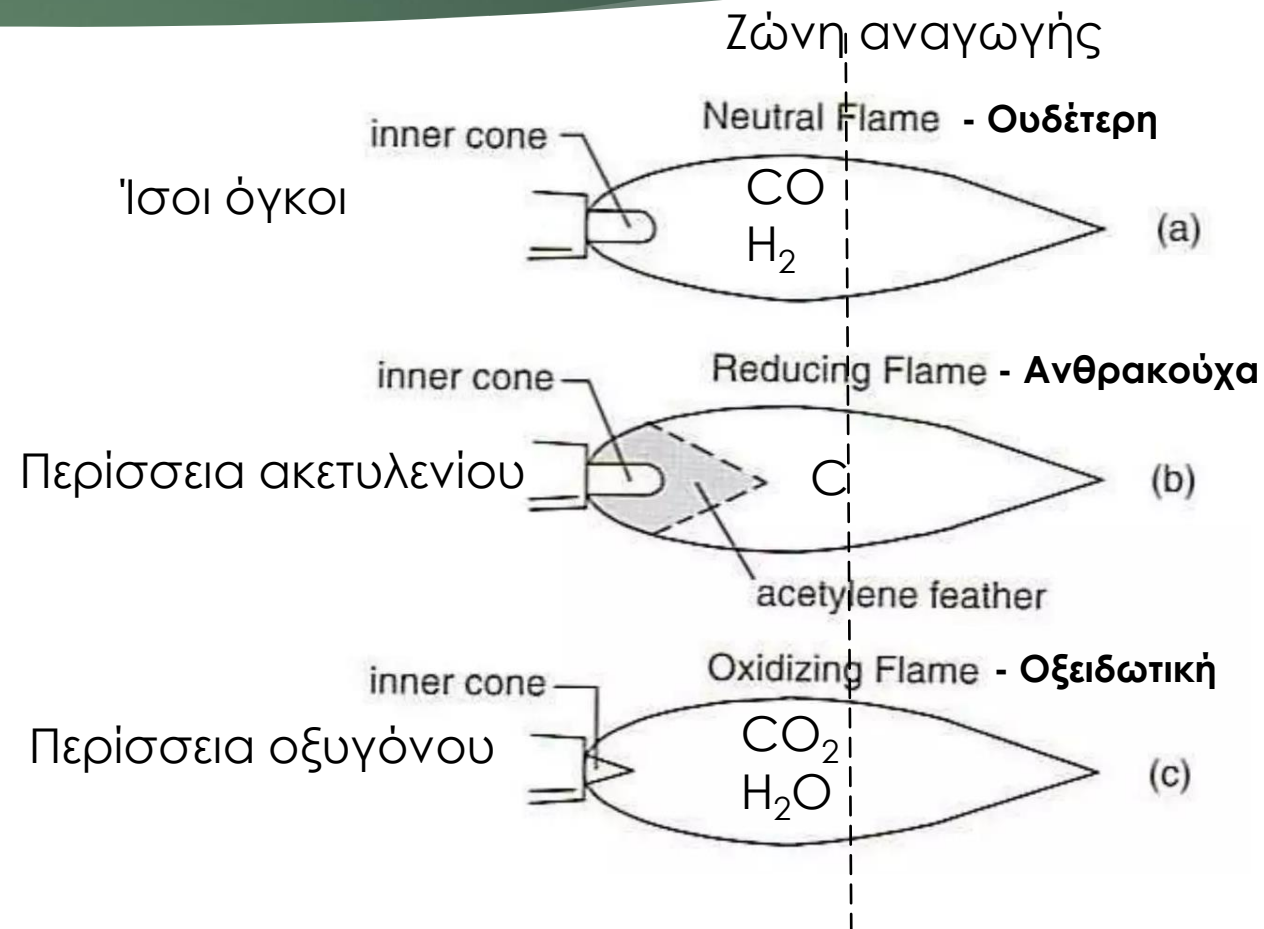
*Ροή θερμικής ενέργειας = Θερμογόνος δύναμη X Ταχύτητα καύσης

Φλόγα οξυγόνου - ακετυλενίου



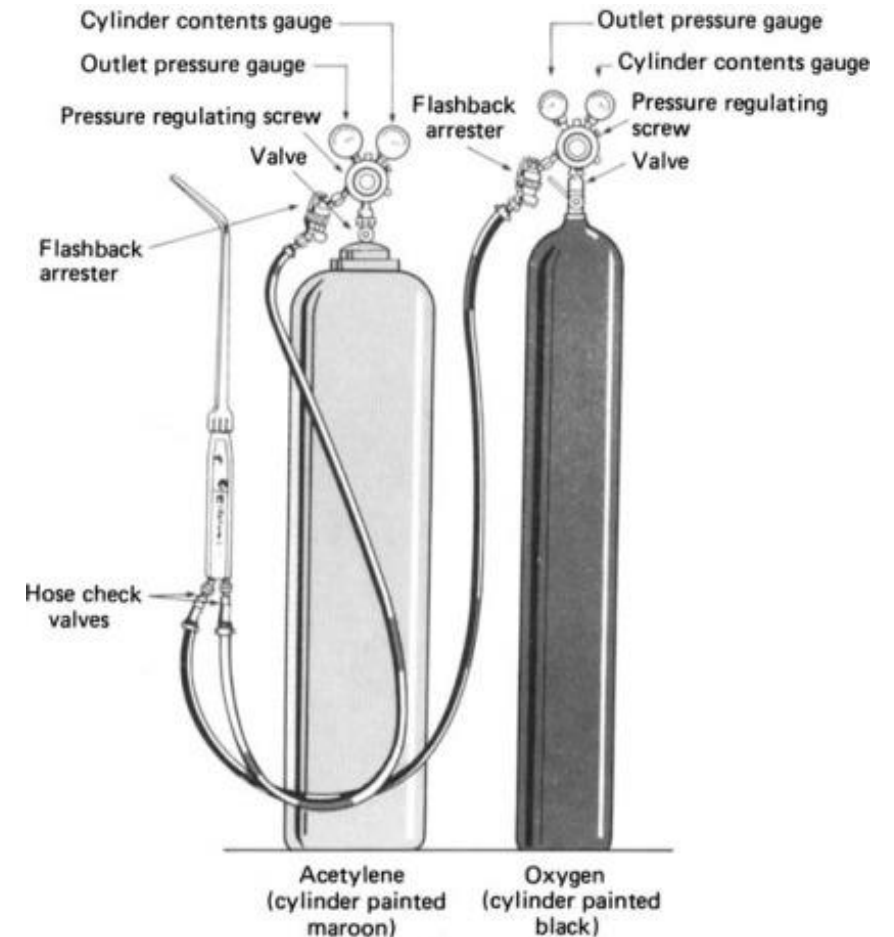
Φλόγα οξυγόνου - ακετυλενίου

- Αύξηση ποσότητας οξυγόνου οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας
- Μεγαλύτερη ποσότητα ακετυλενίου στο μίγμα, σε σχέση με το οξυγόνο οδηγεί στη δημιουργία του άσπρου φτερού
- Ανθρακούχα φλόγα χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να προσθέσουμε άνθρακα στο μητρικό υλικό.
- Οξειδωτική φλόγα χρησιμοποιείται όταν το μητρικό υλικό είναι ψευδάργυρος, ορείχαλκος κτλ.



Εξοπλισμός συγκόλλησης με καύσιμο αέριο οξυγόνο

- ❑ Μανόμετρα
- ❑ Ρυθμιστές πίεσης αερίων
- ❑ Φιάλες αερίων
- ❑ Εύκαμπτοι αγωγοί
- ❑ Καυστήρας
- ❑ Ακροφύσιο



Τύποι καυστήρων οξυγονοκόλλησης

❑ Χαμηλής πίεσης ή έγχυσης

- Παροχή ακετυλενίου σε χαμηλή πίεση (7 kPa)
- Παροχή οξυγόνου σε υψηλότερη πίεση πίεση (70 - 275 kPa)
- Ο αναμείκτης λειτουργεί σαν εγχυτής

❑ Θετικής πίεσης

- Παροχή των αερίων με την ίδια πίεση (105 kPa)
- Ανάμειξη

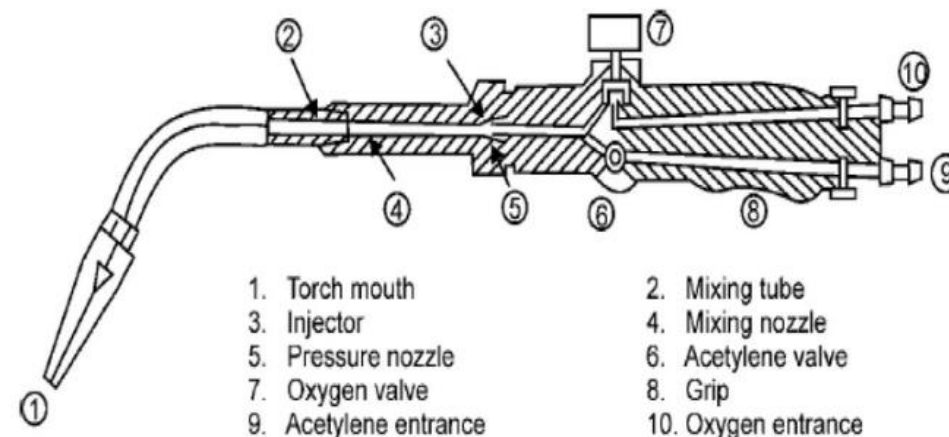


Fig. 7.9: Welding Torch

Πλεονεκτήματα οξυγονοκόλλησης

- ❑ Δεν απαιτεί παροχή ηλεκτρικής ενέργειας
- ❑ Ευκολία στη χρήση και τη μεταφορά
- ❑ Είναι φθηνή
- ❑ Ρύθμιση θερμοκρασίας της φλόγας και του οξειδωτικού δυναμικού της
- ❑ Έλεγχος γεωμετρίας της ραφής (ανεξάρτητη από τη φλόγα)

Μειονεκτήματα οξυγονοκόλλησης

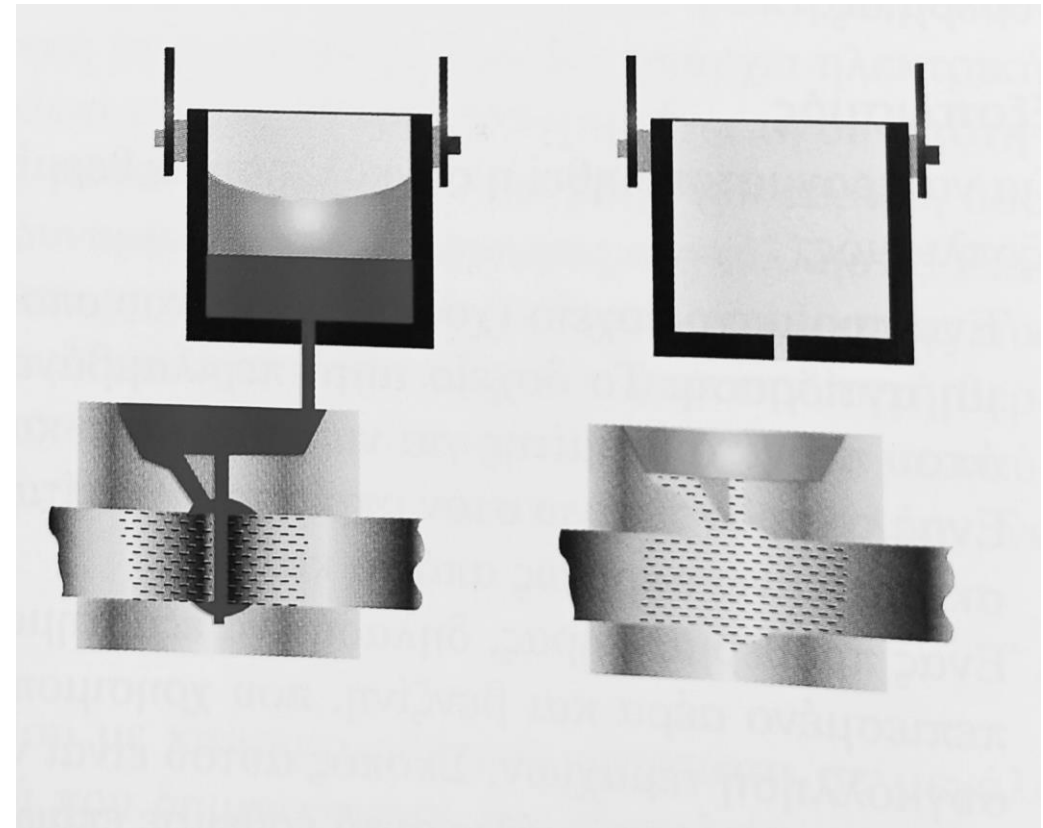
- ❑ Η ποιότητα της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το συγκολλητή
- ❑ Τραχιά ραφή → απαιτεί καθαρισμό και φινίρισμα
- ❑ Μεγάλο εύρος θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης
- ❑ Είναι οικονομικά αποδοτική μόνο για λεπτά πάχη

Εφαρμογές οξυγονοκόλλησης

- ❑ Ανθρακούχοι χάλυβες, μη σιδηρούχα μέταλλα
- ❑ Σωλήνες μικρής διαμέτρου ή λεπτά φύλλα
- ❑ Επισκευαστική ζώνη
- ❑ Έχει αντικατασταθεί με τη συγκόλληση με μεταλλικό ηλεκτρόδιο και προστατευτικό αέριο (MIG)

Εξοπλισμός συγκόλλησης με θερμότητα

- ❑ **Πυρίμαχο δοχείο** με οπή στον πυθμένα του
- ❑ **Καλούπι** ειδικά διαμορφωμένο για κάθε συγκόλληση
- ❑ **Τρίποδας** για την τοποθέτηση του πυρίμαχου δοχείου ακριβώς πάνω από το καλούπι
- ❑ **Προθερμαντήρας** πεπιεσμένου αέρα και βενζίνης για την αποφυγή της ψύξης του τήγματος του υλικού της συγκόλλησης καθώς εισέρχεται στο καλούπι



Διαδικασία συγκόλλησης με θερμότη

- ▶ Τοποθέτηση κόνεων αλουμινίου και μεταλλικών οξειδίων σε κατάλληλη αναλογία στο πυρίμαχο δοχείο
- ▶ Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί οξείδιο σιδήρου (FeO), το μίγμα αναφλέγεται με σπινθηρισμούς και γρήγορα η θερμοκρασία φτάνει έως τους 3000 C.
- ▶ Όμοια και με χρήση αιματίτη (Fe_2O_3), με μεγαλύτερη δυσκολία όμως, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί αυθόρμητα η χημική αντίδραση του με το αλουμίνιο.
- ▶ Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση απαιτείται εξωτερική πηγή θερμότητας

Διαδικασία συγκόλλησης με θερμίτη

- ▶ Μέσω διάχυσης, κυρίως στην υγρή φάση, που λόγω της υψηλής θερμοκρασίας επιταχύνεται,
- ▶ ηλεκτρόνια φεύγουν από το αλουμίνιο και προσλαμβάνονται από ιόντα σιδήρου
- ▶ σχηματίζοντας θερμίτη (τριοξείδιο του αλουμινίου και ελεύθερο στοιχειακό σίδηρο)
- ▶ και απελευθερώνοντας πολύ μεγάλη ποσότητα θερμότητας
- ▶ Η χημική αντίδραση οξειδίου σιδήρου ή αιματίτη με αλουμίνιο, παρουσιάζει μηχανισμό αυτοσυντήρησης, καθώς θερμαίνει τις γειτονικές περιοχές του μίγματος
- ▶ Έτσι το «μέτωπο» αντίδρασης κινείται σε όλα το μίγμα και
- ▶ διαδίδεται σαν «κύμα»

Διαδικασία συγκόλλησης με θερμότητα

- ▶ Το τριοξείδιο αλουμινίου είναι ελαφρύτερο από τον σίδηρο και αναδύεται στην επιφάνεια
- ▶ Αντίθετα ο σίδηρος είναι πιο βαρύς βυθίζεται στον πυθμένα του πυρίμαχου δοχείου
- ▶ Απ' όπου περνά μέσα από την οπή και καταλήγει στο καλούπι
- ▶ Εκεί γεμίζει το διάκενο μεταξύ του μητρικού μετάλλου,
- ▶ με τη βοήθεια του προθερμαντήρα προκαλεί την τήξη των άκρων του μητρικού μετάλλου
- ▶ Μέσω ψύξης δημιουργείται το μέταλλο συγκόλλησης, το οποίο είναι κράμα σιδήρου και τήγματος του μητρικού μετάλλου



Πλεονεκτήματα συγκόλλησης με θερμότητα

- ❑ Χαμηλό κόστος
- ❑ Φορητότητα
- ❑ Είναι ταχεία
- ❑ Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Μειονεκτήματα συγκόλλησης με θερμότητα

- ❑ Δεν έχει αυτοματοποιηθεί – πάντα απαιτείται ένας συγκολλητής
- ❑ Κακή ποιότητα συγκόλλησης (πόροι, εγκλείσματα, ρωγμές, ανομοιογένεια κόκκων)
- ❑ Χαμηλή αντοχή του μετάλλου συγκόλλησης, συχνά αστοχούν λόγω κόπωσης

Εφαρμογές συγκόλλησης με θερμότητα

- ❑ Τροχιές σιδηροδρομικών δικτύων, λόγω της φορητότητας τους
- ❑ Χυτά ατσάλινα τεμάχια και αγωγοί, χάλκινοι αγωγοί
- ❑ Ενώσεις χαλκού με χάλυβα

ΜΕΡΟΣ Β

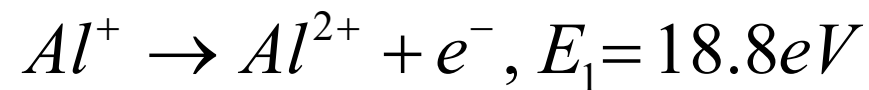
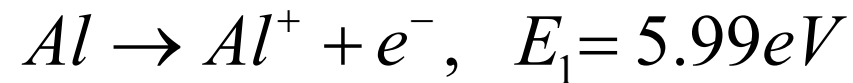
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΤΟΞΟ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Ιονισμός

- ❑ Σε κανονικές συνθήκες τα αέρια έχουν κάποια ποσότητα ενέργειας, που σχετίζεται με την γραμμικής τους ταχύτητα
- ❑ Με την αύξηση της θερμοκρασίας απορροφούν αυτή την ενέργεια πρώτα σε περιστροφική κίνηση και μετά σε ταλάντωση
- ❑ Όταν η ενέργεια ταλάντωσης γίνει πολύ μεγάλη προκαλείται ρήξη των δεσμών που συγκρατούν τα άτομα μεταξύ τους.
- ❑ Με αποτέλεσμα για παράδειγμα τη διάσπαση διατομικών μορίων σε δύο άτομα

Ιονισμός

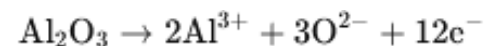
- ❑ Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, γίνεται απορρόφηση τμήμα της ενέργειας από την εξωτερική στοιβάδα, οδηγώντας σε απόσταση ενός από τα ηλεκτρόνια αυτής.
- ❑ Τότε λέμε ότι έχουμε ιονισμό του ατόμου
- ❑ Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε πολλαπλό ιονισμό.



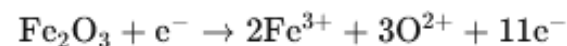
Πολλαπλός διαδοχικός ιονισμός

Ιονισμός

- ❑ Στο ηλεκτρικό τόξο συγκολλήσεων παρατηρείτε πολλαπλός ιονισμός, είτε διαδοχικά είτε σύγχρονα (πολλά ηλεκτρόνια ταυτόχρονα).



Σύγχρονος πολλαπλός ιονισμός



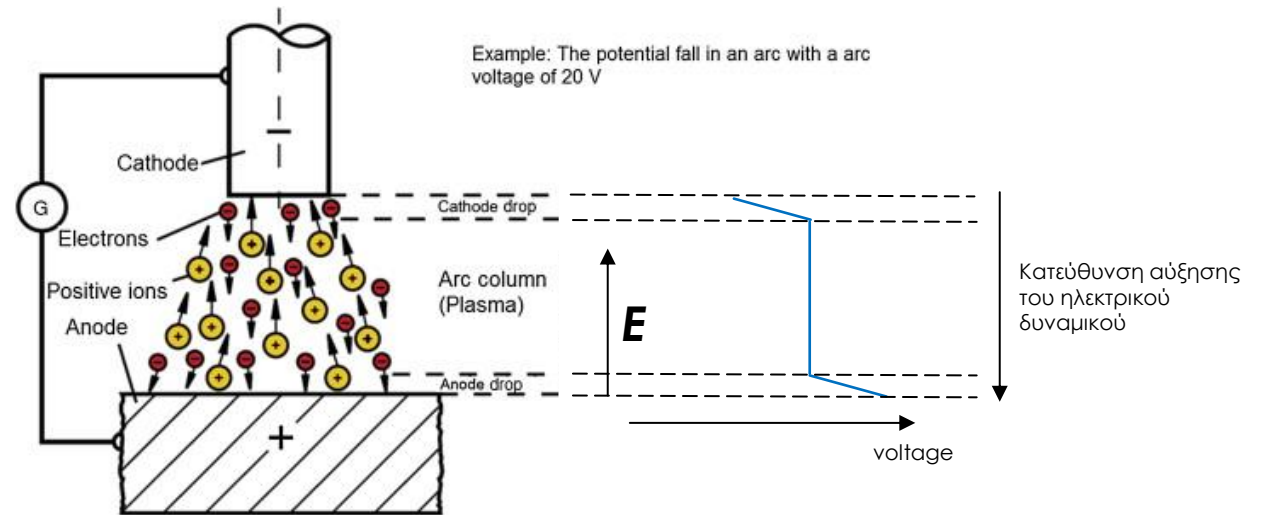
- ❑ Το δυναμικό που απαιτείται για την απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου το ονομάζουμε δυναμικό ιονισμού (σε eV)
- ❑ Εξαρτάται από τον αριθμό ηλεκτρονίων στην εξωτερική στοιβάδα

Ιονισμός

- ❑ Έτσι άτομα μετάλλων στην αλκαλική σειρά (Li, Na, K), έχουν ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική στοιβάδα και ιονίζονται εύκολα
- ❑ Και συνήθως χρησιμοποιούνται στην επένδυση των ηλεκτροδίων, καθώς βοηθούν στην σταθεροποίηση του τόξου
- ❑ Αδρανή αέρια έχουν μεγάλο δυναμικό ιονισμού και χρησιμοποιούνται σαν προστατευτικά αέρια (H, Ar)

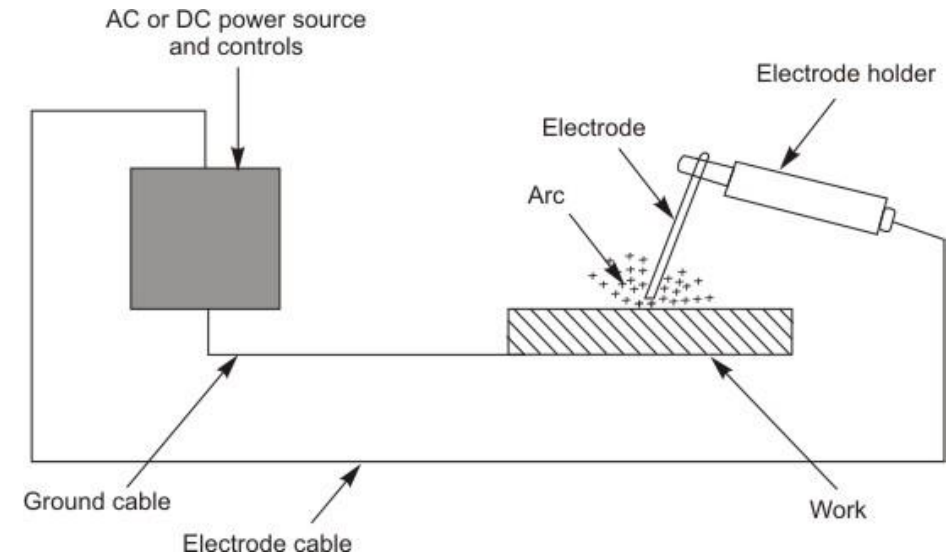
Ηλεκτρική εκκένωση τόξου

- Η διαδρομή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ιονισμένο όγκο αερίου που βρίσκεται υπό την επίδραση ηλεκτρικής τάσης
- δημιουργείται από την κίνηση θετικών ιόντων στην κάθοδο
- και αρνητικών στην άνοδο

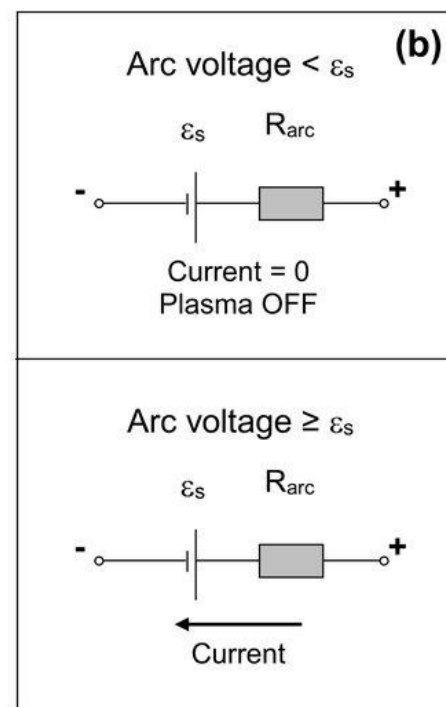
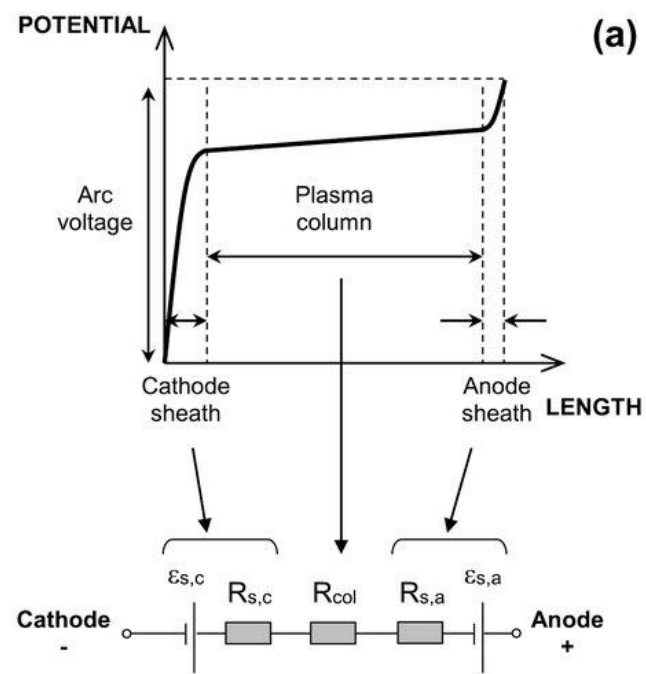
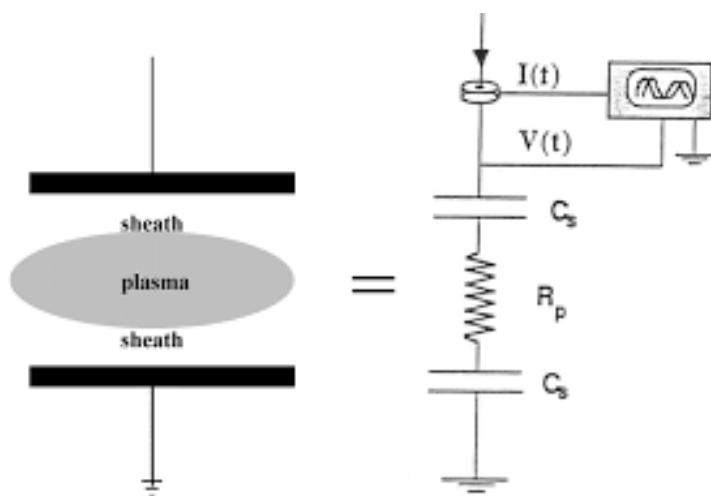


Ηλεκτρικό τόξο

- ❑ Το ηλεκτρόδιο της συγκόλλησης, παίζει το ρόλο της καθόδου, συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής DC, και εκπέμπει ηλεκτρόνια (καθοδικό στίγμα)
- ❑ Το μητρικό υλικό, παίζει το ρόλο της ανόδου, συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής DC και απορροφά ηλεκτρόνια (ανοδικό στίγμα)
- ❑ Ο όγκος του αερίου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου χαρακτηρίζεται ως πλάσμα



Τι είναι πλάσμα

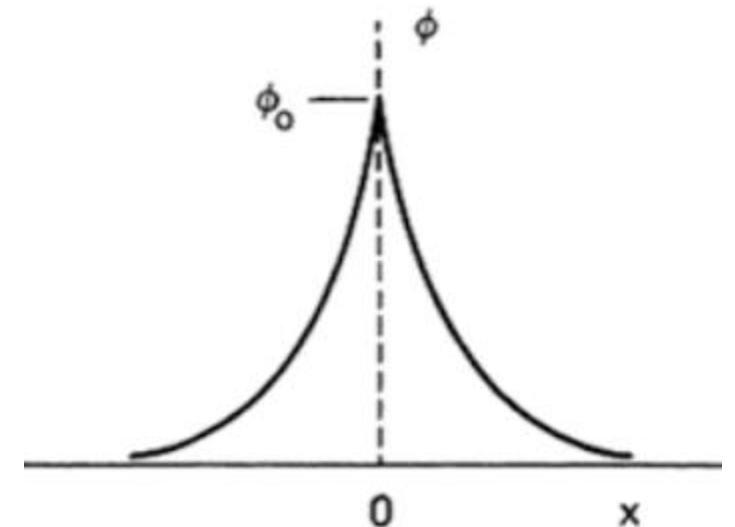


Τι είναι πλάσμα

- ❑ Το πλάσμα είναι ένα σχεδόν ουδέτερο αέριο φορτισμένων και ουδέτερων σωματιδίων που εμφανίζει συλλογική συμπεριφορά
- ❑ Λόγω αυτής της συλλογικής συμπεριφοράς δεν τείνει να συμμορφώνεται στις εξωτερικές επιρροές, αλλά σα να έχει τη δική του βούληση
- ❑ Δεν χαρακτηρίζεται κάθε ιονισμένο αέριο ως πλάσμα,

Μήκος Debye και θωράκιση Debye

- ❑ Έστω φορτίο q στο εσωτερικό του πλάσματος.
- ❑ Σε ένα ορισμένο μήκος $\lambda_d \ll L$, τα ηλεκτρόνια που είναι πιο κινητικά λόγω της μετακίνησής τους δημιουργώντας ένα πλεόνασμα ή έλλειμα αρνητικού φορτίου,
- ❑ έτσι ώστε η διαταραχή λόγω του φορτίου q να μην γίνεται αισθητή στον όγκο του πλάσματος σε απόσταση μεγαλύτερης του μήκους Debye λ_d
- ❑ Δηλαδή με αυτή την κίνηση των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται η θωράκιση Debye



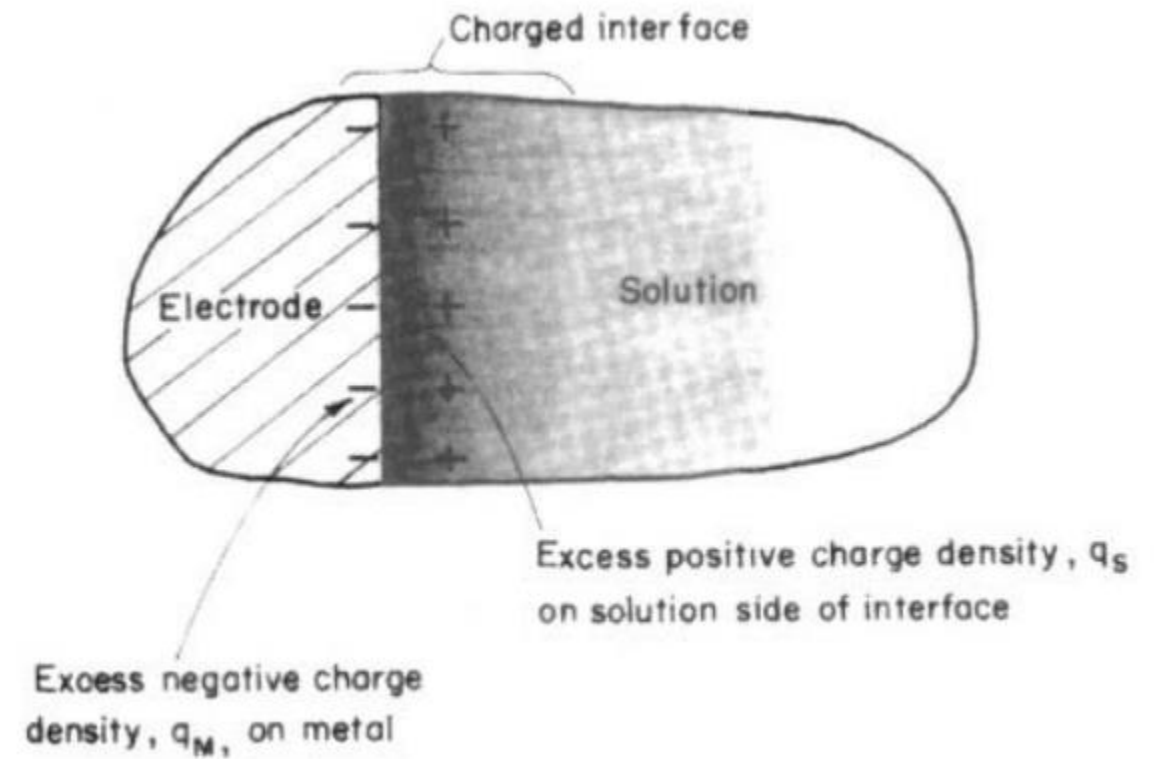
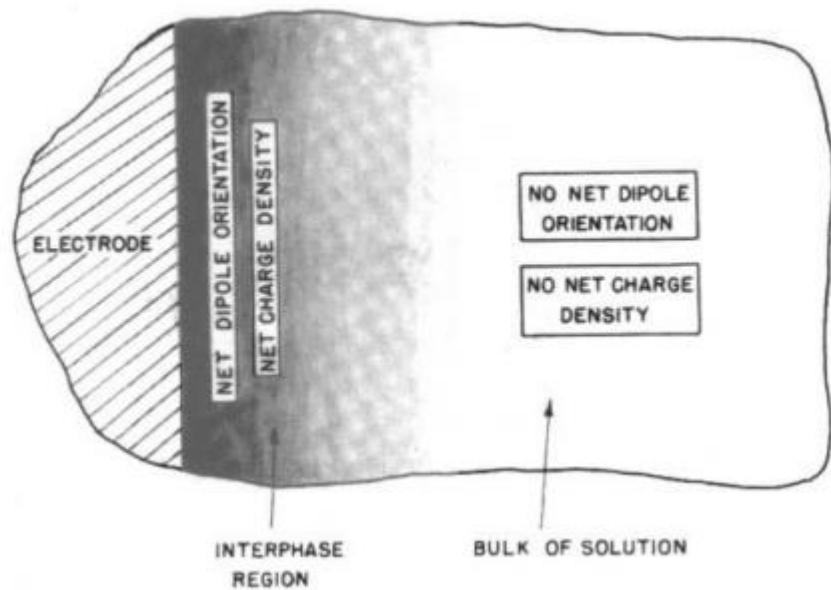
Συνθήκες χαρακτηρισμού πλάσματος

- ❑ Το μήκος Debye να είναι πολύ μικρό σε σχέση με το συνολικό μήκος του πλάσματος $\lambda_d \ll L$
- ❑ Να υπάρχει μεγάλος αριθμός σωματιδίων στο stealth $N_d \gg 1$
- ❑ Να μη συμπεριφέρεται σαν ουδέτερο αέριο $\omega\tau \gg 1$

Συχνότητα πλάσματος

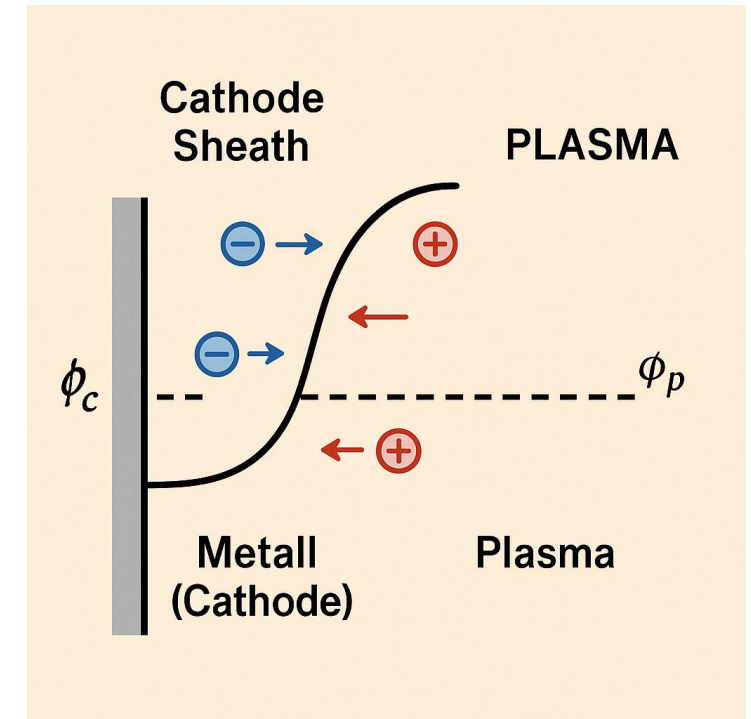
- ❑ Έστω διαταραχής της ηλεκτρικής ουδετερότητας στο πλάσμα.
- ❑ Τα ηλεκτρόνια, καθώς έχουν πολύ μικρότερη μάζα από τα ιόντα, ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στη διαταραχή, προσπαθώντας να αποκαταστήσουν την ουδετερότητα
- ❑ Λόγω της μάζας τους τα ιόντα δεν μπορούν αν ακολουθήσουν την κίνηση των ηλεκτρονίων
- ❑ Έτσι τα ηλεκτρόνια ταλαντώνονται περί τα ιόντα
- ❑ Η συχνότητα ταλάντωσης τους ονομάζεται συχνότητα πλάσματος

Ηλεκτρόδιο σε διάλυμα



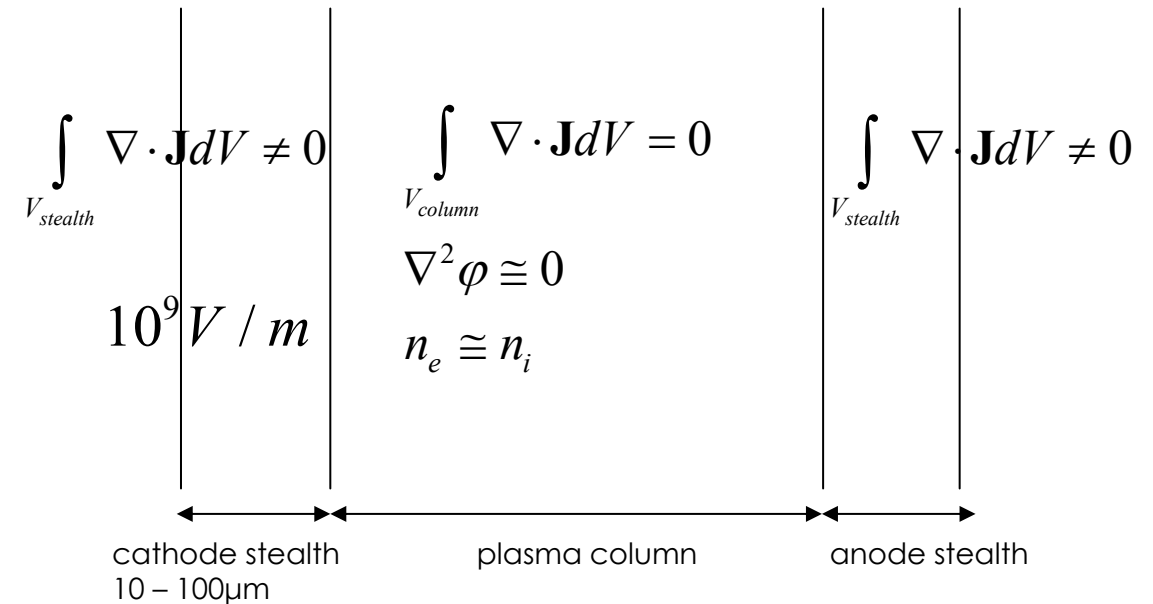
Ηλεκτρόδιο σε πλάσμα

- ❑ Το ηλεκτρόδιο της καθόδου εκπέμπει ηλεκτρόδια
- ❑ Θεωρήστε το ηλεκτρόνιο σαν ένα μεγάλο αρνητικό ιόν
- ❑ Στο πλάσμα σχηματίζεται γύρω του το καθοδικό **sheath**, όπου τα θετικά ιόντα λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται λόγω της καθόδου επιταχύνονται και έλκονται προς αυτή
- ❑ εξισορροπώντας την ηλεκτρική διαφορά σε μια λεπτή επιφάνεια ακριβώς μπροστά από την κάθοδο, δηλαδή την διεπιφάνεια καθόδου - sheath



Καθοδικό stealth

- Πιο αραιή περιοχή, αποτελείται από κατιόντα και ηλεκτρόνια
- Τα ηλεκτρόνια κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα
- Δύο μηχανισμοί εκπομπής υπάρχουν η θερμιονική και η ψυχρή



Θερμιονική εκπομπή

- ❑ Το καθοδικό στίγμα παραμένει σε μια σταθερή θέση
- ❑ Τυπικές τιμές πυκνότητας ρεύματος $10^6 - 10^8 \text{ A/m}^2$
- ❑ Απαιτεί μεγάλο ποσό θερμικής ενέργειας την οποία η κάθοδος τα αποκτά μέσω 3 μηχανισμών
 1. Βομβαρδισμός από κατιόντα
 2. Θέρμανση Joule και αγωγή
 3. Ανασχηματισμός (δύναμη Coulomb)

Βομβαρδισμός από κατιόντα

- ❑ Επιταχύνονται στο stealth λόγω του ισχυρού ***E*** και προσπίπτουν με μεγάλη κινητική ενέργεια στην κάθοδο, δηλαδή
- ❑ Μεταφέρουν ορμή και ενέργεια
- ❑ Θερμαίνουν τοπικά στην κάθοδο (2000 – 4000 °C)

Θέρμανση Joule και αγωγή

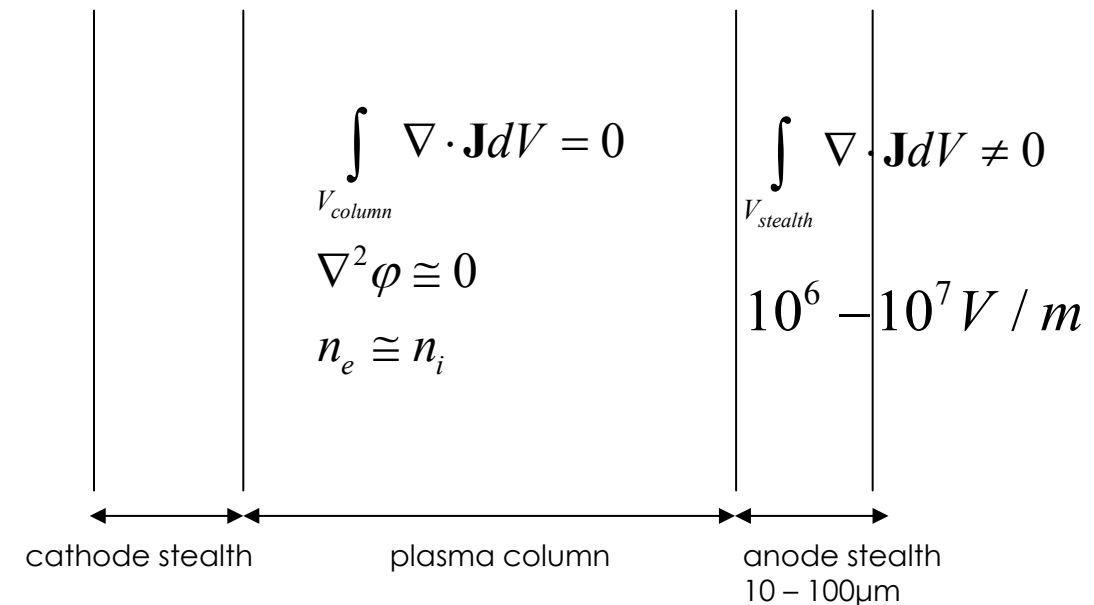
- ❑ Μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας, του τόξου μετατρέπεται σε θέρμανση Joule
- ❑ Αυτή διαχέεται μέσω του εσωτερικού του ηλεκτροδίου και τροφοδοτεί την επιφάνεια, διατηρώντας της σε θερμοκρασία εκπομπής
- ❑ Σε ηλεκτρόδια με καλή αγωγιμότητα συμβάλει στη σταθεροποίηση της θερμονικής εκπομπής

Ψυχρή εκπομπή

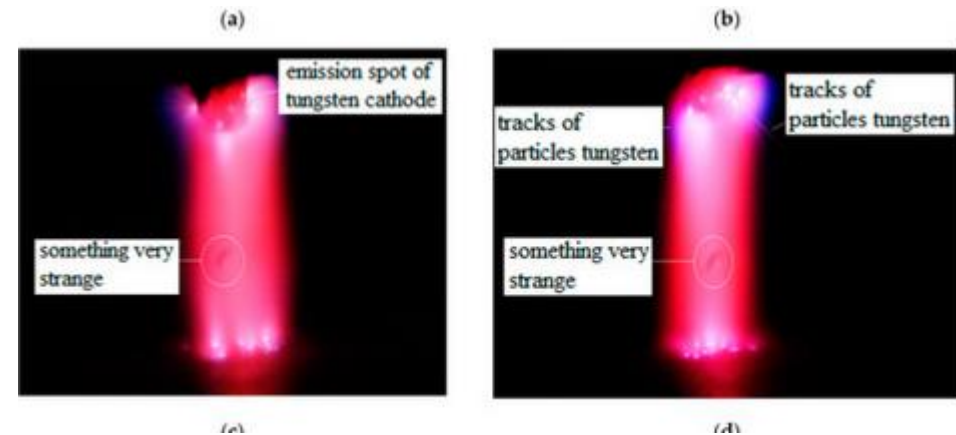
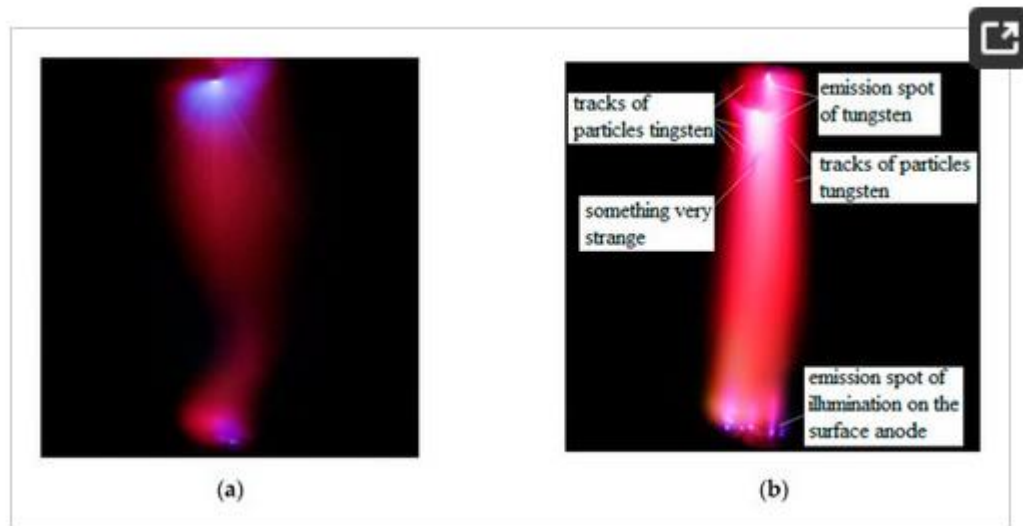
- ❑ Το καθοδικό στίγμα κινείται άτακτα με μεγάλη ταχύτητα στην επιφάνεια
- ❑ Τυπικές τιμές πυκνότητας ρεύματος $10^{10} - 10^{12} \text{ A/m}^2$
- ❑ Συμβαίνει λόγω πεδιακής εκπομπής τοπικά, λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου σε μικροεξοχές ή ανωμαλίες της καθόδου
- ❑ Επιπροσθέτως δευτερογενής εκπομπή, σημαντικά μικρότερης έντασης όμως, παρατηρείται λόγω της κρούσης των ιόντων στην κάθοδο
- ❑ Πιθανώς αυτό συμβαίνει λόγω της συγκέντρωσης των κατιόντων στην επιφάνεια των οξειδίων, δημιουργώντας τοπικά πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο
- ❑ ως αποτέλεσμα τα οξείδια ατμοποιούνται και συνεπώς τα ηλεκτρόνια είτε ιονίζονται ή αποσπώνται από τα οξείδια

Ανοδικό stealth

- ❑ Πιο αραιή περιοχή, αποτελείται από ανιόντα και ηλεκτρόνια
- ❑ Τα ηλεκτρόνια κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και συγκρούονται στην κάθοδο
- ❑ Ως αποτέλεσμα η κάθοδος θερμαίνεται και παρατηρείται τήξη
- ❑ Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου (λόγω της ανόδου) παρατηρείται ιονισμός
- ❑ Μέσω χημικών αντιδράσεων στην υγρή φάση της ανόδου και ανασχηματισμού στο stealth, προκύπτουν άτομα μετάλλων
- ❑ Μετά την ψύξη δημιουργείται το μέταλλο της συγκόλλησης



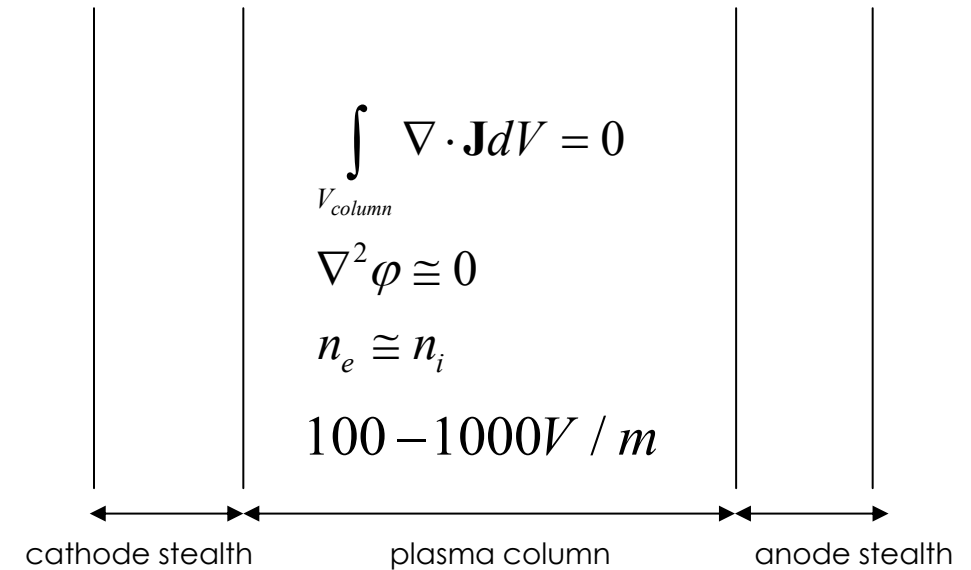
Ανοδικό και καθοδικό στίγμα



Στήλη πλάσματος

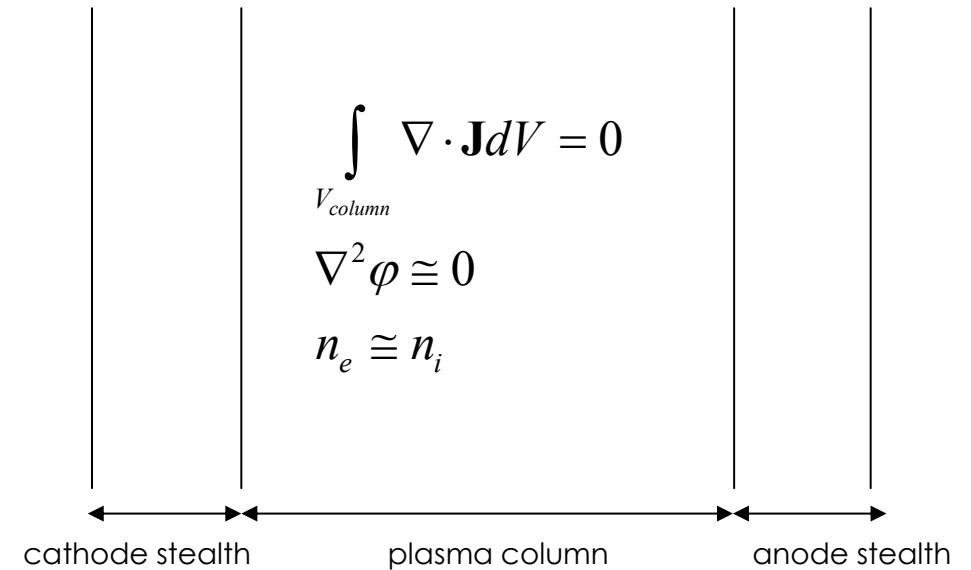
- Η πιο πυκνή περιοχή του πλάσματος
- Επειδή το βάρος των ηλεκτρονίων είναι πολύ μικρότερο από αυτό των ιόντων σχεδόν όλο το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται μέσω της κίνησης των ηλεκτρονίων
- $T_e > T_g$

Κατά το διάστημα μεταξύ των συγκρούσεων σωματιδίων, δημιουργείται μια απόκλιση στην κίνηση των ηλεκτρονίων, έτσι για την επανάκτηση της θερμοδυναμικής ισορροπίας απορροφούν περισσότερη ενέργεια από το ηλεκτρικό πεδίο.



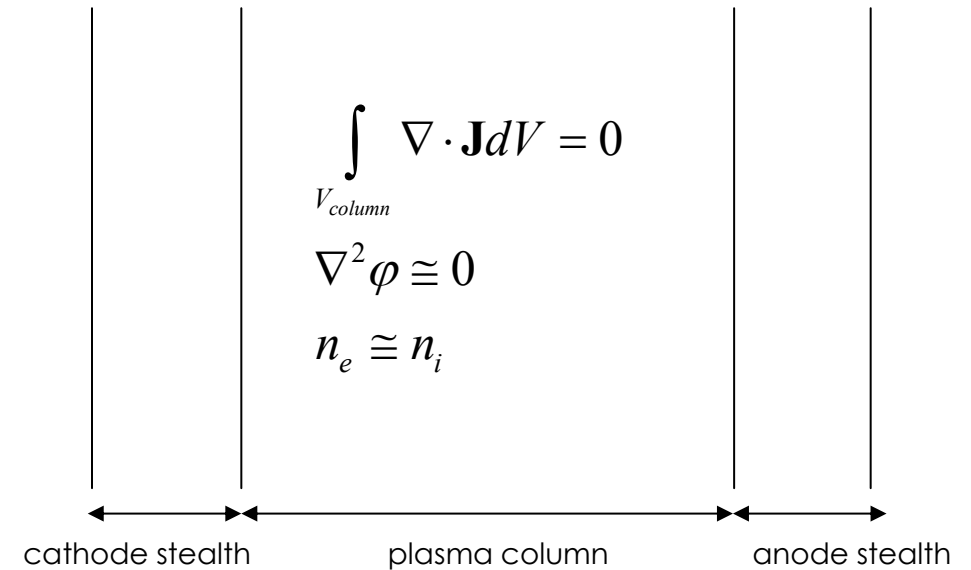
Δέσμες πλάσματος στη στήλη

- ❑ Λόγω φυσικών και ηλεκτρικών φαινομένων δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές δέσμες πλάσματος (jets)
- ❑ Με λίγα λόγια μετακίνηση των ειδών κάθετα από την άνοδο στην κάθοδο
- ❑ Οι δέσμες πλάσματος επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα της συγκόλλησης



Δέσμες πλάσματος στη στήλη

- Λόγω της μεγάλης ταχύτητας των δεσμών πλάσματος παρατηρείται μιας μορφής δυσκαμψίας μεταξύ της στήλης και του stealth, με τη μορφή αντίστασης στις πλευρικές κινήσεις (π.χ. ριπές ανέμου)
- Αυτή η δυσκαμψία βοηθάει στην σταθερότητα του τόξου και στην καλή ποιότητα της συγκόλλησης



Δομή του τόξου

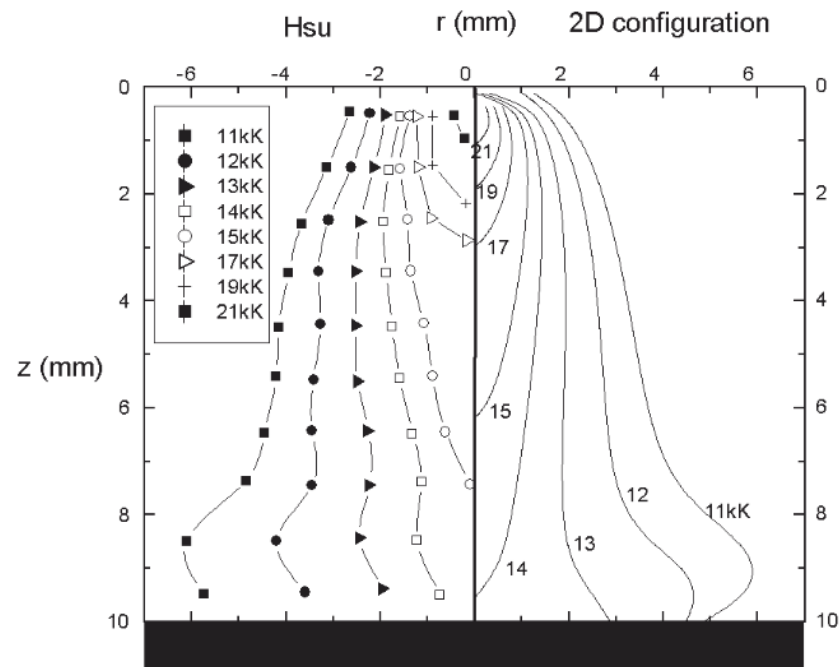


Figure 12. Experimental (lhs [2]) isotherms and isotherms calculated (rhs) using a two-dimensional model [63] for a free-burning arc in argon ($I = 200$ A).

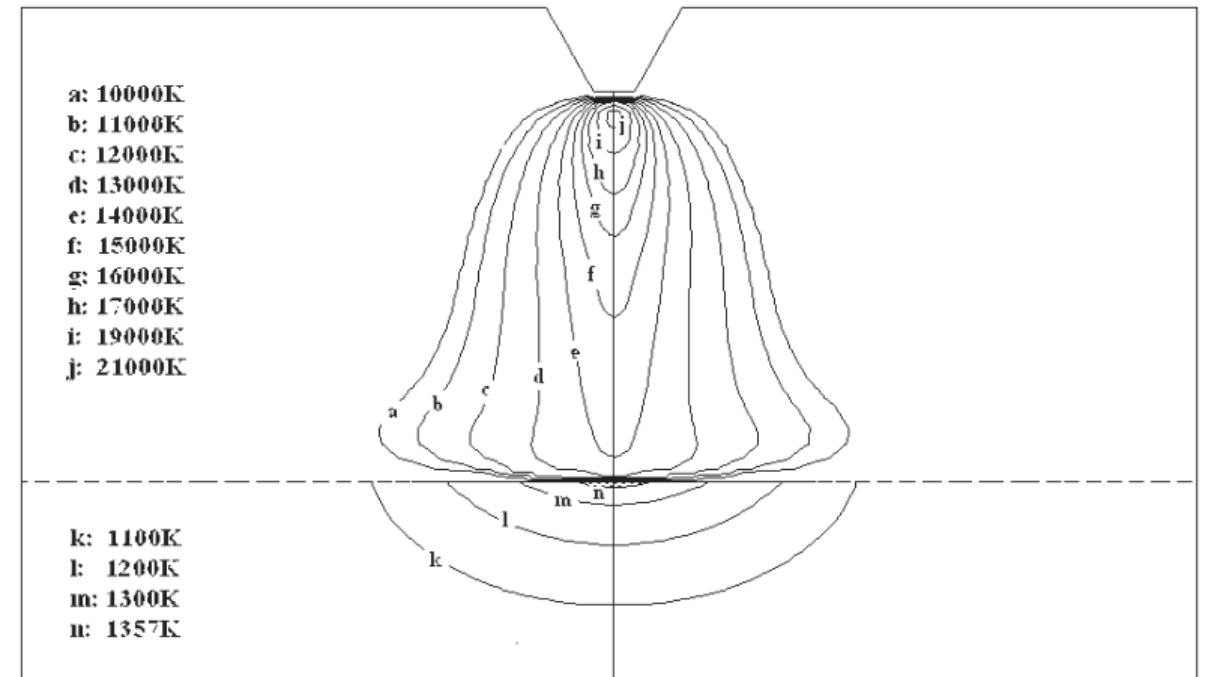
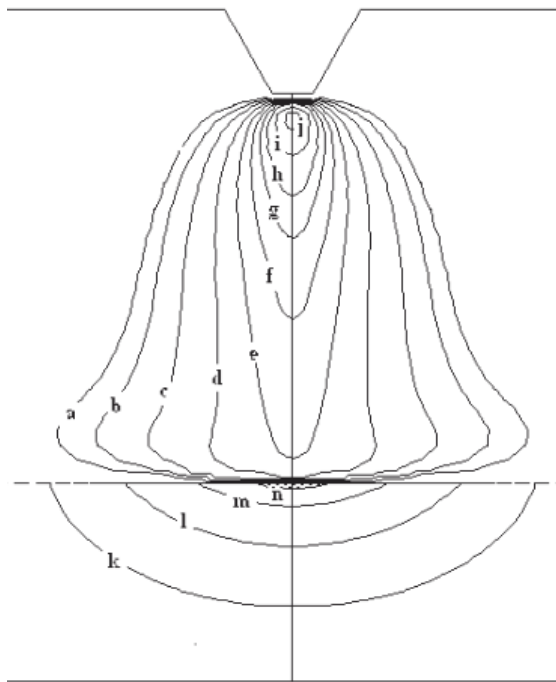


Figure 16. Isotherms within an argon plasma ($I = 200$ A) and a copper anode.

Δομή του τόξου



isotherms within an argon plasma ($I = 200$ A) and a

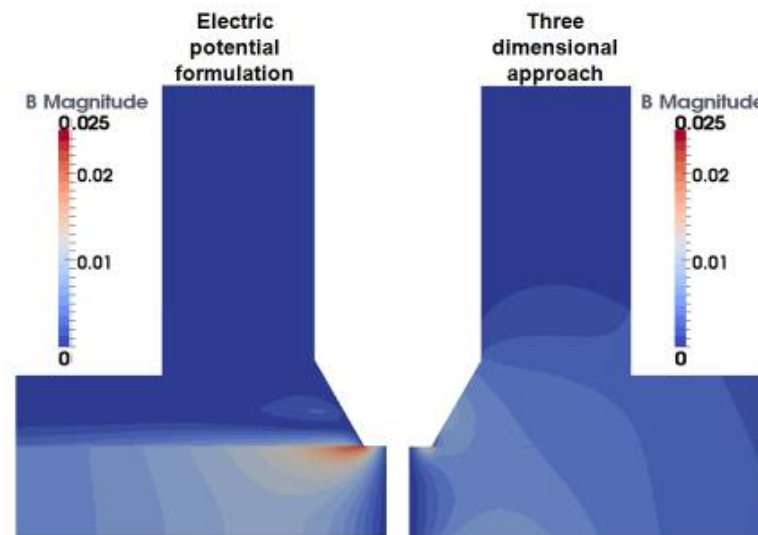


Figure 8: Magnetic field magnitude calculated with the electric potential formulation (left) and the three-dimensional approach (right).

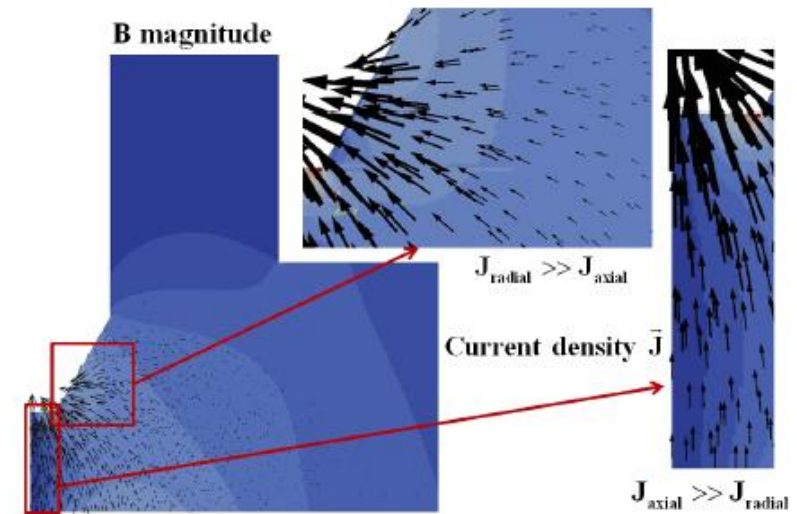
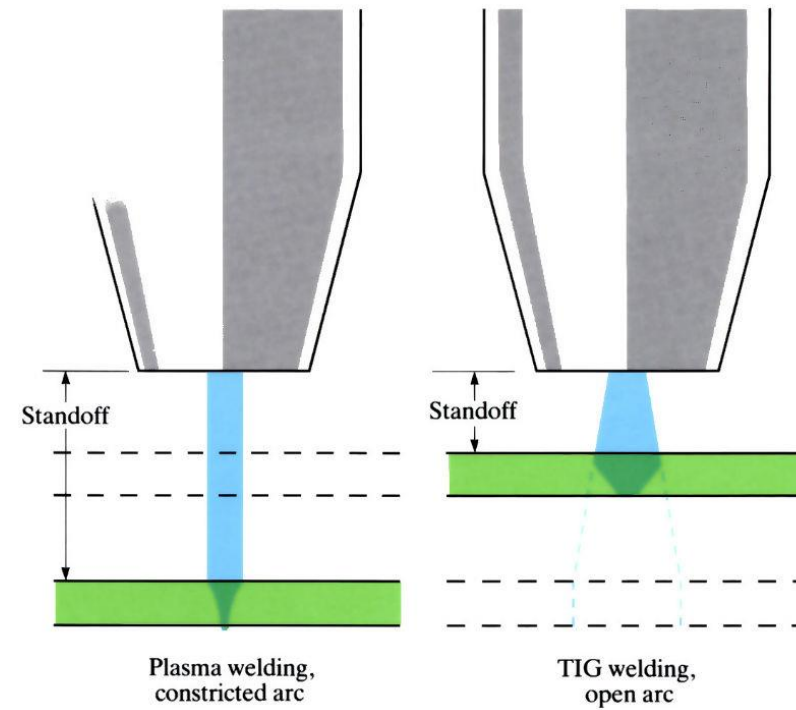
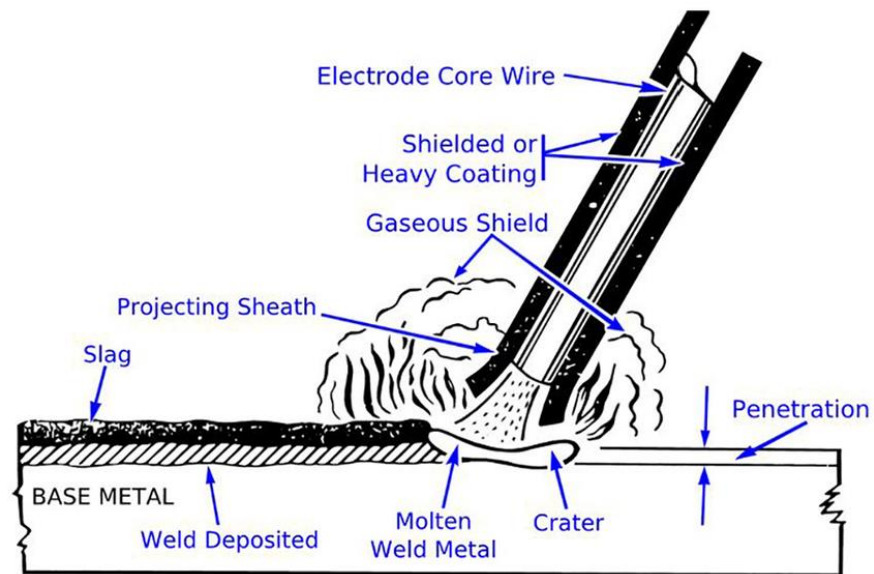


Figure 9: Current density vector calculated with the three-dimensional approach.

Δομή του τόξου



Παράμετροι τόξου

- ❑ Ιδιότητες μητρικού μετάλλου
- ❑ Ιδιότητες ηλεκτροδίου
- ❑ Σχήμα ηλεκτροδίου
- ❑ Μήκος τόξου
- ❑ Προστατευτικό αέριο
- ❑ Ρεύμα στο ηλεκτρόδιο
- ❑ Προδιαγραφές

Μαθηματική διατύπωση

magnetohydrodynamic (MHD) model

Physical Process	Equation	Description / Remarks
Continuity of mass	$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$	Conservation of mass for the compressible plasma–gas mixture.
Momentum conservation	$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ $\boldsymbol{\tau} = \mu[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}]$	Navier–Stokes equation including the Lorentz body force responsible for the plasma constriction (Maecker effect).
Electron energy conservation	$\nabla \cdot \left(\frac{5}{2} n_e k_B T_e \mathbf{u} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_e - \mathbf{j}_e \cdot \mathbf{E} - Q_{\text{el}}^{e \rightarrow h} - Q_{\text{in}}^{e \rightarrow h} - Q_{\text{rad}}$	Non-LTE energy balance for electrons; includes Joule heating, conduction, inelastic/elastic energy exchange, and radiative losses.
Heavy-particle energy conservation	$\nabla \cdot \left(\frac{5}{2} (n_A + n_I) k_B T_h \mathbf{u} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_h + \mathbf{j}_I \cdot \mathbf{E} + Q_{\text{el}}^{h \rightarrow e}$	Energy equation for heavy species (atoms and ions) coupled with electron energy through elastic collisions.
Species continuity (general form)	$\nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{u}) + \nabla \cdot \mathbf{J}_i = S_i$	Transport equation for each species; Y_i denotes the mass fraction and S_i the source term due to ionization and recombination.

Μαθηματική διατύπωση

magnetohydrodynamic (MHD) model

Physical Process	Equation	Description / Remarks
Generalized Ohm's law	$\mathbf{j}_q = \sigma \mathbf{E} + \Delta \mathbf{j}_q$, with $\Delta \mathbf{j}_q = \sum_i q_i \mathbf{J}_i$	Constitutive relation for current density including drift and diffusion contributions.
Equation of state and quasi-neutrality	$p = n_h k_B T_h + n_e k_B T_e$, $n_e = n_I$	Two-temperature pressure formulation under quasi-neutrality assumption.
Magnetic induction and potential	$\mu_0 \Delta \mathbf{A} = -\mathbf{j}_q$, $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$	Magnetic field generated self-consistently by the current density.
Solid domains (electrodes,	$\nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + \sigma_s E^2 = 0$, $\nabla \cdot (\sigma_s \nabla \phi) = 0$	Joule heating and heat conduction within solid electrodes

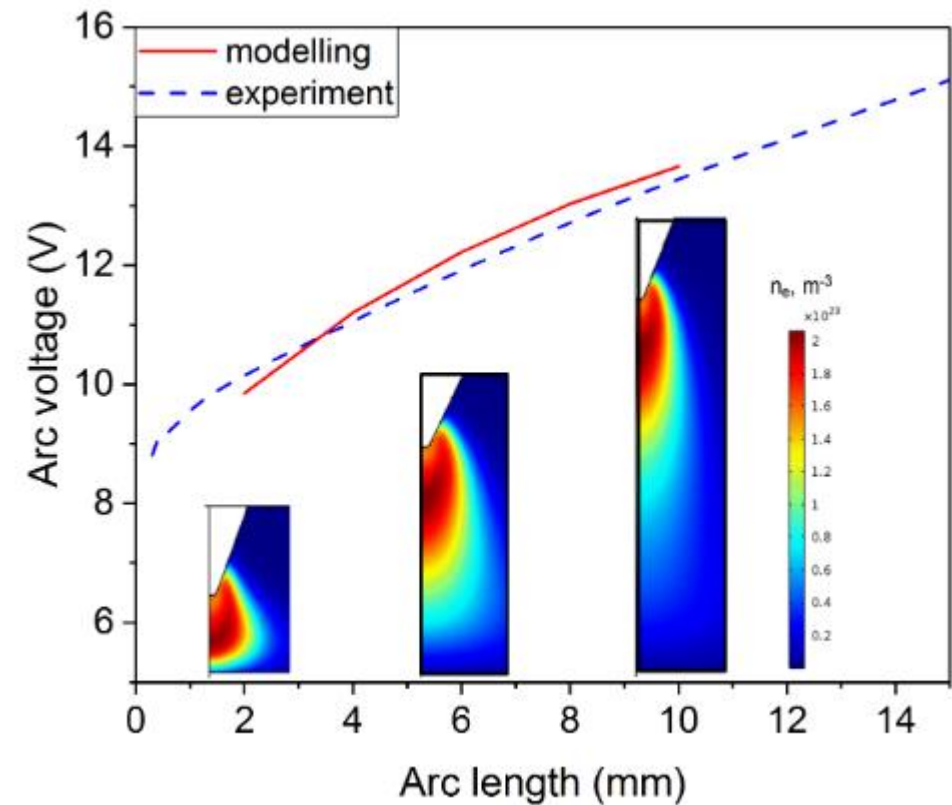
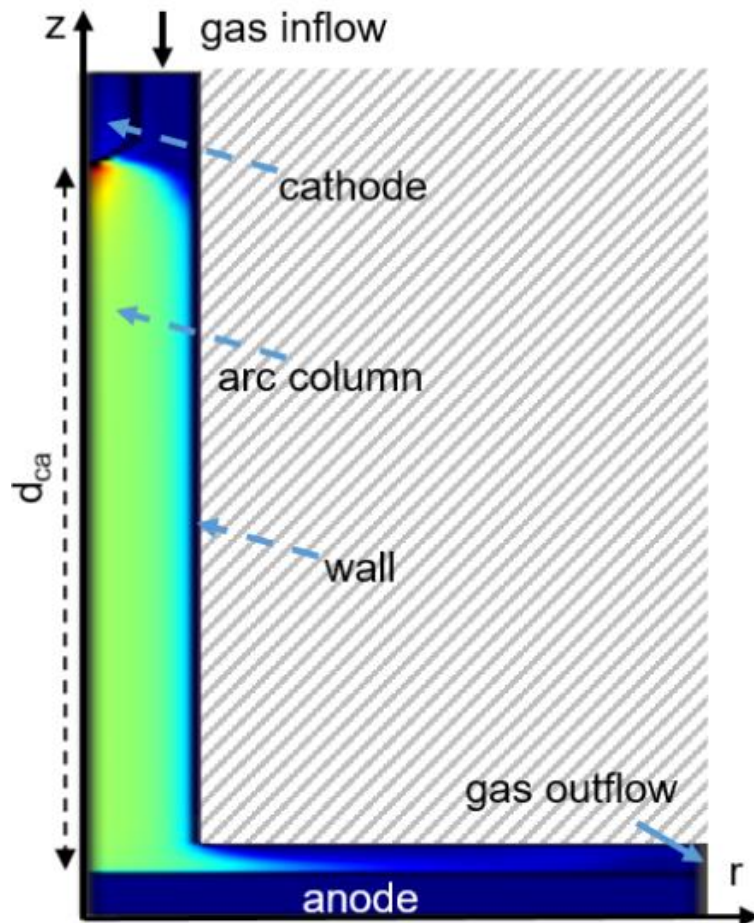
Μαθηματική διατύπωση

Aspect	Equation	Description / Remarks
Stefan–Maxwell diffusion (quasi-neutral plasma)	$\sum_{j \neq i} \frac{n_i n_j}{D_{ij}} (\mathbf{w}_i - \mathbf{w}_j) = -\nabla(n_i k_B T_{ij}) + \nabla(p Y_i) + Z_i e n_i \mathbf{E} + \mathbf{R}_i^T$	Complete multicomponent diffusion formulation accounting for pressure, electric-field (drift), and thermal diffusion driving forces.
Alternative form of driving forces	$\sum_{j \neq i} \frac{\rho_i \rho_j}{\tilde{D}_{ij}} (\mathbf{w}_i - \mathbf{w}_j) = Z_i \frac{e}{m_i} \mathbf{E} + \mathbf{G} - \nabla H_i$	Equivalent momentum-exchange representation facilitating the link to Ohm's law.
Mass-based diffusion fluxes	$\mathbf{J}_i = \rho Y_i (\mathbf{w}_i - \mathbf{u}), \quad \sum_i \mathbf{J}_i = 0$	Definition of diffusive mass fluxes; the total mixture velocity $\mathbf{u}$ is mass-weighted.
Effective-binary closure (Ramshaw approximation)	$\mathbf{J}_i = -\rho D_i^{\text{eff}} \left(\frac{Y_i}{z_i} \mathbf{G}_i - \sum_j \frac{Y_j}{z_j} \mathbf{G}_j \right)$	Simplified closure used in practical non-LTE plasma simulations.
Charge-carrying flux and current density	$\mathbf{j}_q = \sum_i q_i \mathbf{J}_i = \sigma \mathbf{E} + \Delta \mathbf{j}_q$	Decomposition of the total current into conductive and diffusive components.
Mass–mole fraction transformations	$Y_i = \frac{\tilde{n}_i m_i}{\rho}, \quad \sum_i Y_i = 1$	Relation between mole fraction x_i and mass fraction Y_i ; the model operates naturally in Y_i .

Μαθηματική διατύπωση

Region / Boundary	Variables / Equations	Boundary Condition	Physical Interpretation
(1) Axis of symmetry	$\rho, \mathbf{u}, T, T_e, p, \phi, \mathbf{A}$	$\partial_r(\cdot) = 0, u_r = 0, J_r = 0$	Symmetry line; zero normal gradients and no radial mass or current flux.
(2) Gas inlet	$\mathbf{u}, T, T_e$	$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{in}}, T = T_{\text{in}}, T_e = T_{\text{in}}$	Prescribed inflow velocity and gas/electron temperatures (typically 300 K).
(3) Gas outlet	All flow and thermal variables	Neumann condition $\partial_n(\cdot) = 0$	Open-flow boundary allowing free outflow without artificial reflection.
(5) Cathode (W)	$\mathbf{J}, T, \phi$	Current: $\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = J_{\text{cath}}$ (from sheath balance). Energy: $-k_h \nabla T \cdot \mathbf{n} = q_{\text{ion}} + q_{\text{rec}} - q_{\text{em}} + q_{\text{rad}} + q_c^{\text{add}}$. Potential: $\phi = \phi_{\text{cath}}$.	Coupled plasma–sheath energy and current balance including ion impact heating, thermionic emission cooling, and radiation losses; sheath potential drop U_c^{sh} applied.
(6) Anode (Cu or steel plate)	$\mathbf{J}, T, \phi$	Current: $\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = J_{\text{anod}}$. Energy: $-k_h \nabla T \cdot \mathbf{n} = q_{e,\text{dep}} + q_{\text{rec}} + q_{\text{rad}} + q_a^{\text{add}}$. Potential: $\phi = 0$ (grounded).	Energy deposition by incoming electrons and recombining ions; typically negligible anode sheath potential ($U_a^{\text{sh}} \approx 0$).
(7) Plasma/sheath interface (Knudsen layer)	Ion and electron fluxes	$\Gamma_i = n_i u_{\text{Bohm}}, \quad \Gamma_e = n_e v_{e,\text{therm}} \exp\left(-\frac{e\Delta\phi_{\text{sh}}}{k_B T_e}\right)$	Continuity of charged-particle fluxes across the sheath edge. Ions enter the sheath at the Bohm speed $u_{\text{Bohm}} = \sqrt{k_B T_e / m_i}$; electrons follow a Maxwellian thermal flux $v_{e,\text{therm}} = \sqrt{8k_B T_e / (\pi m_e)}$ reduced by the sheath potential drop $\Delta\phi_{\text{sh}}$.
(8) Electric and magnetic potentials (outer boundaries)	$\phi, \mathbf{A}, \mathbf{B}$	Electric: $\phi = \phi_{\text{cath}}$ at the cathode, $\phi = 0$ at the anode; on insulated walls $\partial_n \phi = 0$. Magnetic: $\mu_0 \Delta \mathbf{A} = -\mathbf{j}_q, \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$; outer boundaries enforce zero tangential components and continuity across plasma–solid interfaces.	Ensures self-consistent electromagnetic field distribution consistent with current continuity and electrical insulation.

Αριθμητικά αποτελέσματα



Αριθμητικά αποτελέσματα

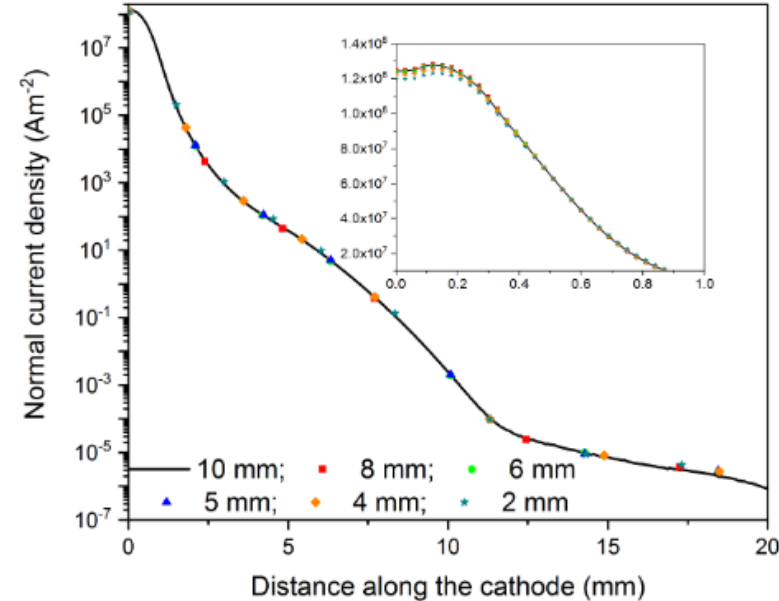
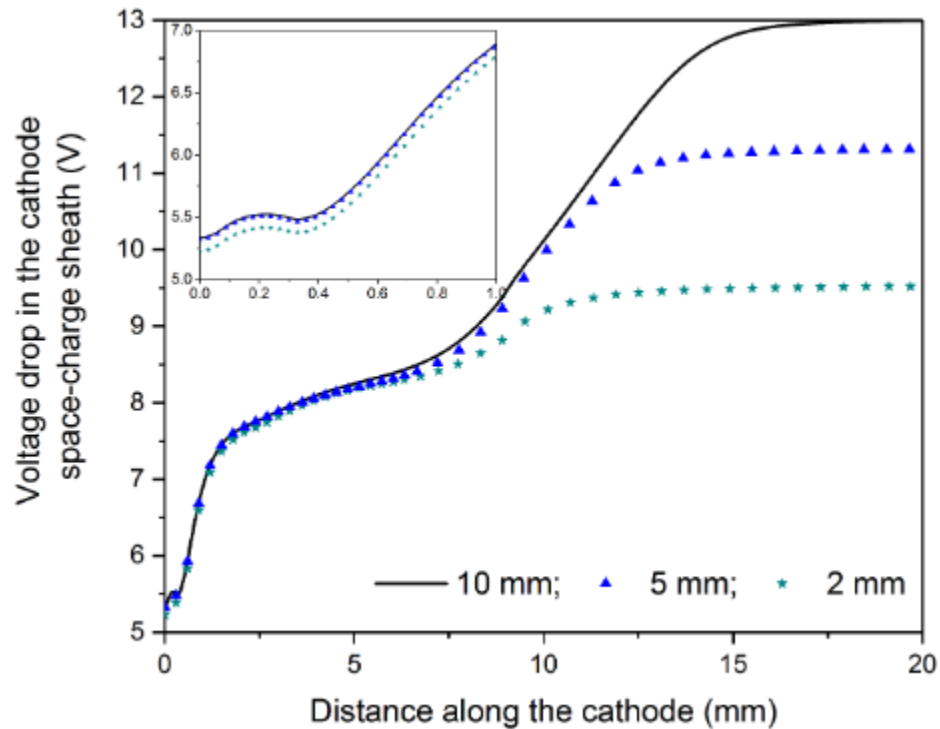


Figure 11. The normal current density on the cathode surface as a function of the distance along the cathode. The distance is measured from the tip centre. The notations are the same as in Fig. 10.

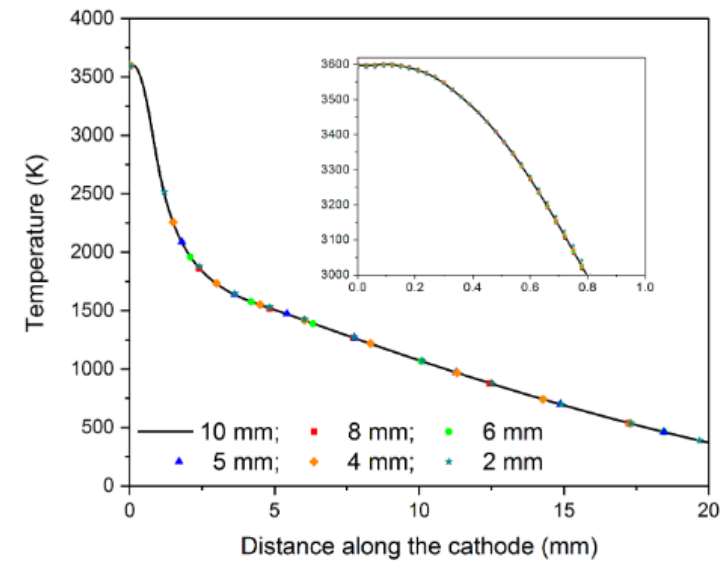


Figure 10. The temperature on the cathode surface as a function of the distance along the cathode. The distance is measured from the tip centre. The solid line presents the results for an arc length of 10 mm. Symbols present the results for shorter arc lengths.

Αριθμητικά αποτελέσματα

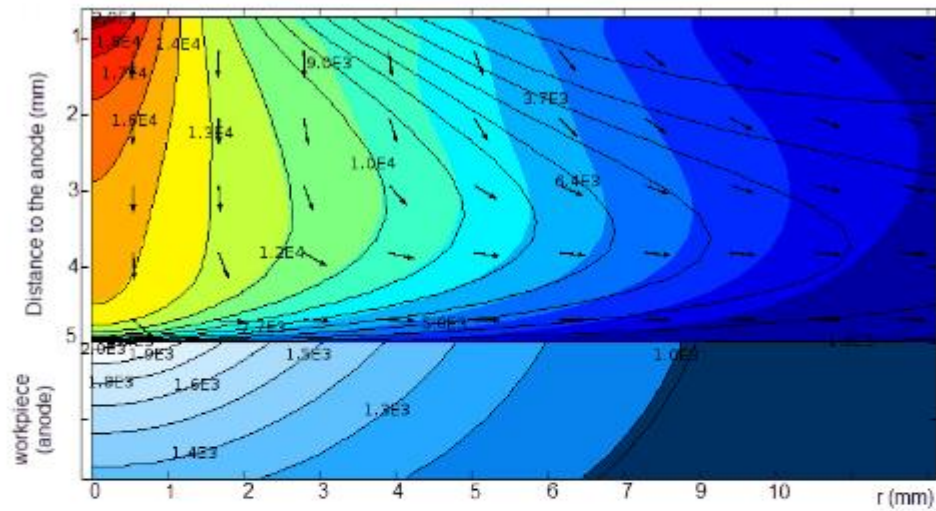
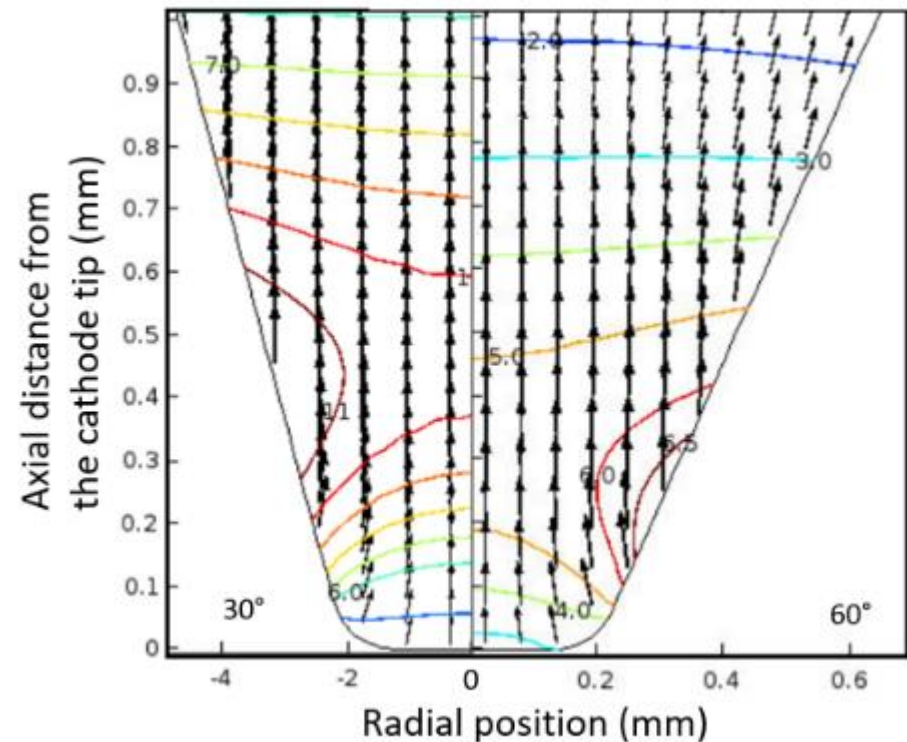


Figure 18. Temperature in kelvin of heavy particles (black lines) and electrons (filled coloured contours) in the arc region and in the workpiece. The flow field is presented by arrow indicators. Arc current 150 A, inter-electrode distance 5 mm.



Αριθμητικά αποτελέσματα

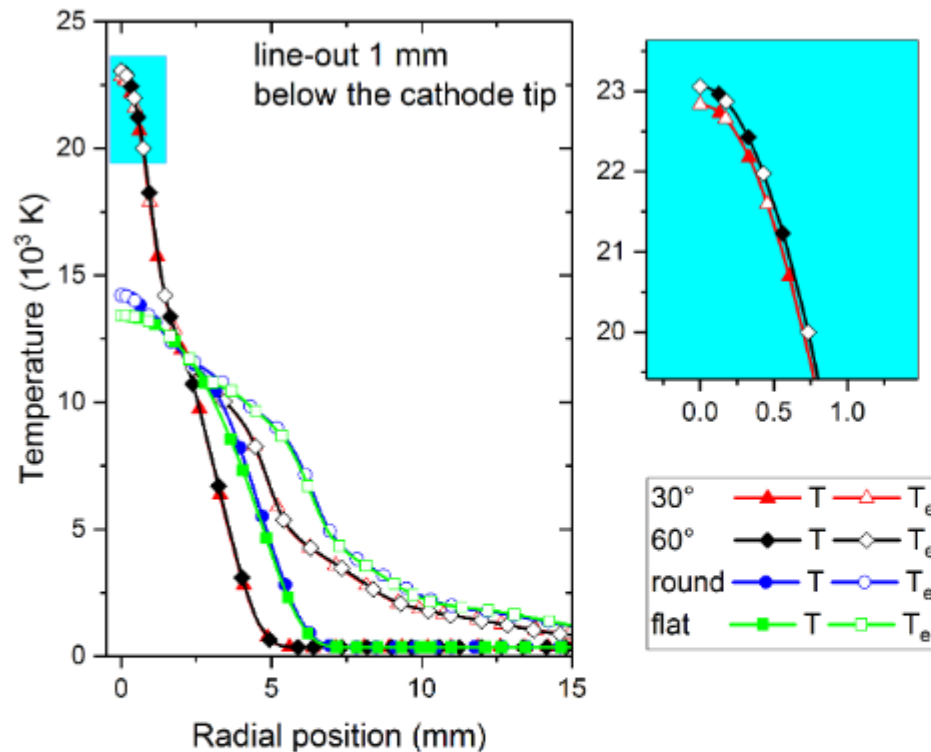


Figure 2. Radial profiles of the temperatures of electrons (lines with open symbols) and heavy particles (lines with solid symbols) for various shapes of the cathode tip along a line-out with an axial distance from the cathode tip of 1 mm.

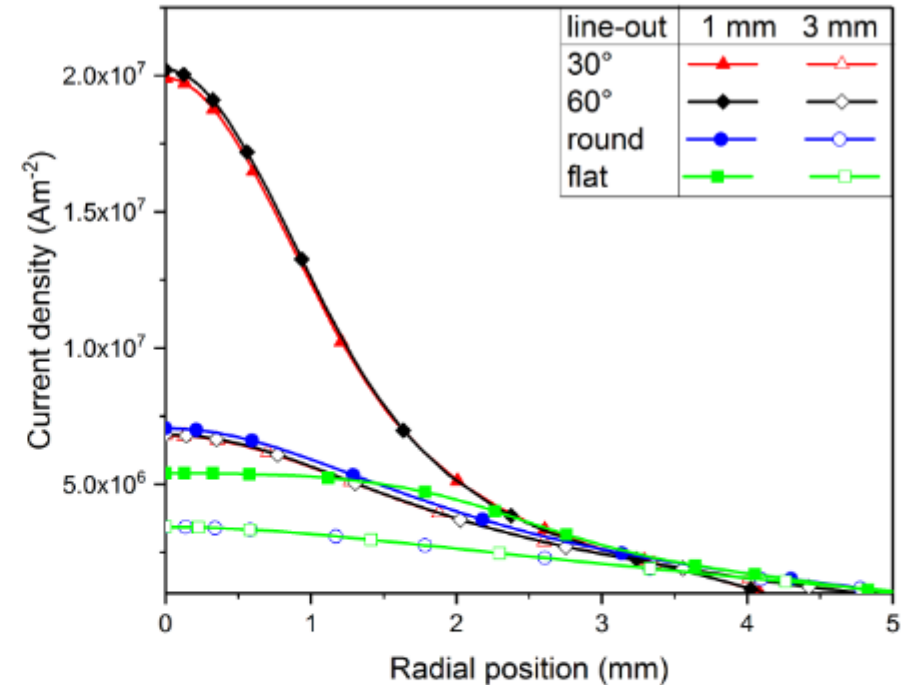


Figure 4. Radial profiles of the magnitude of the current density for various shapes of the cathode tip along a line-out with an axial distance from the cathode tip of 1 mm (lines with solid symbols) and 3 mm (lines with open symbols).

Αριθμητικά αποτελέσματα

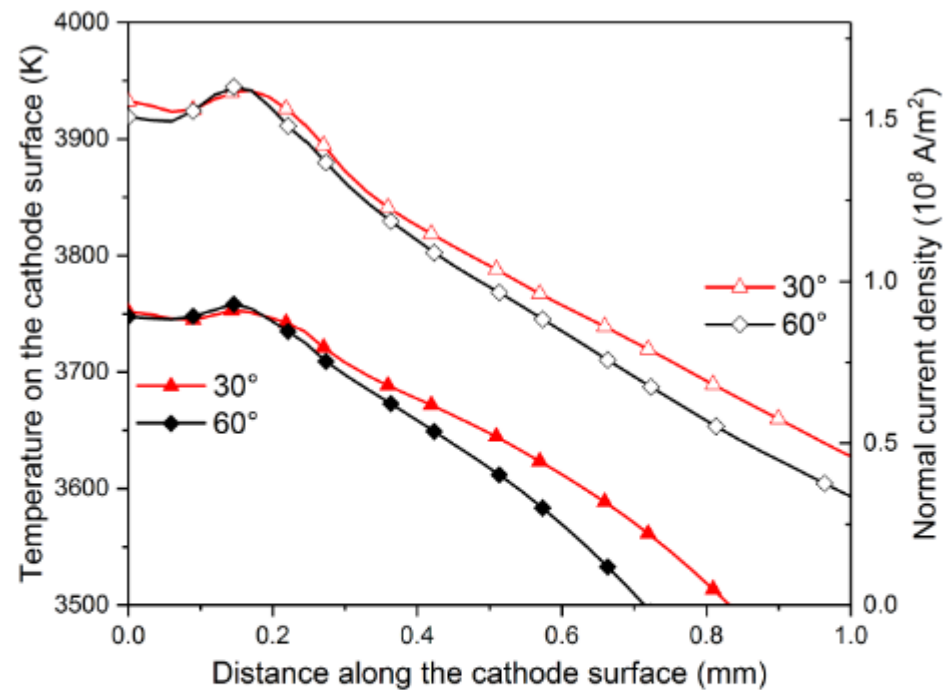
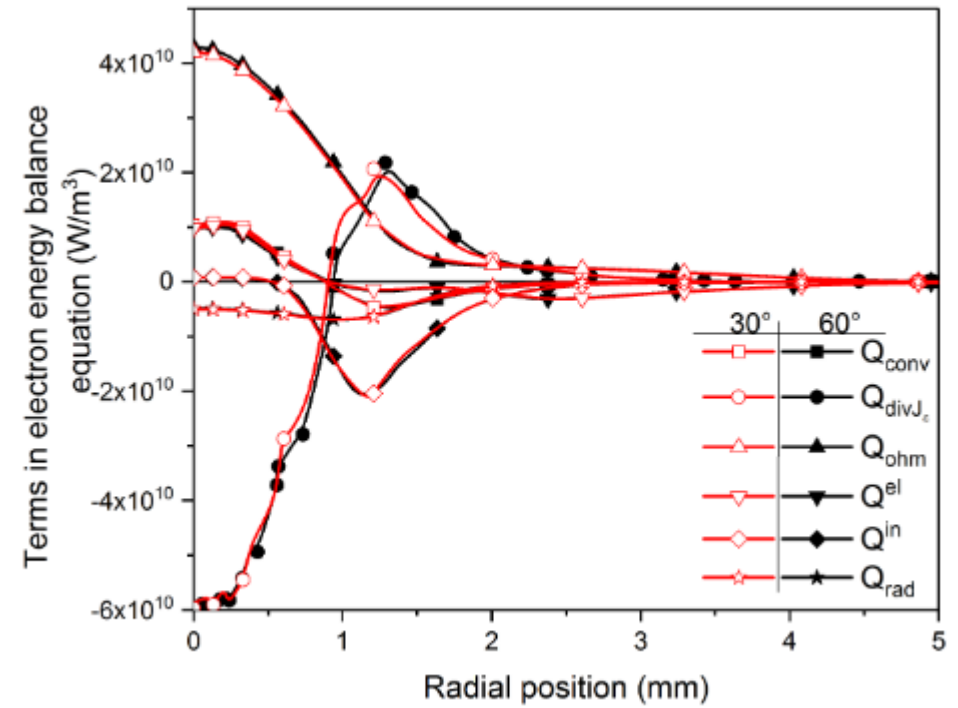


Figure 5. The temperature (solid symbols) and the normal current density (open symbols) on the cathode surface for a cone angle of 30° (triangles) and 60° (diamonds). The distance is measured from the centre of the cathode tip.



Αριθμητικά αποτελέσματα

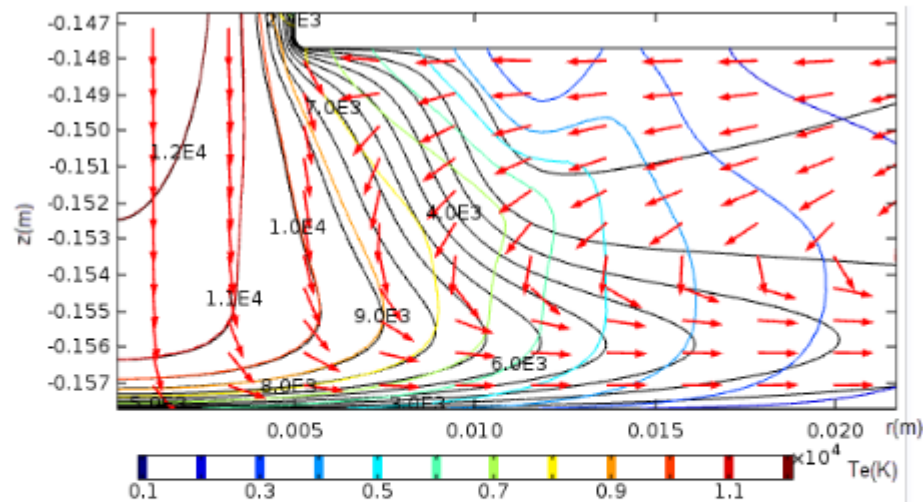


Figure 13. Iso-lines of temperatures in kelvin of heavy particles (black) and electrons (coloured) and normalized arrow indicators of the gas flow in the anode region of the arc at a gas flow rate of 4.5 slpm and an arc current of 200 A.

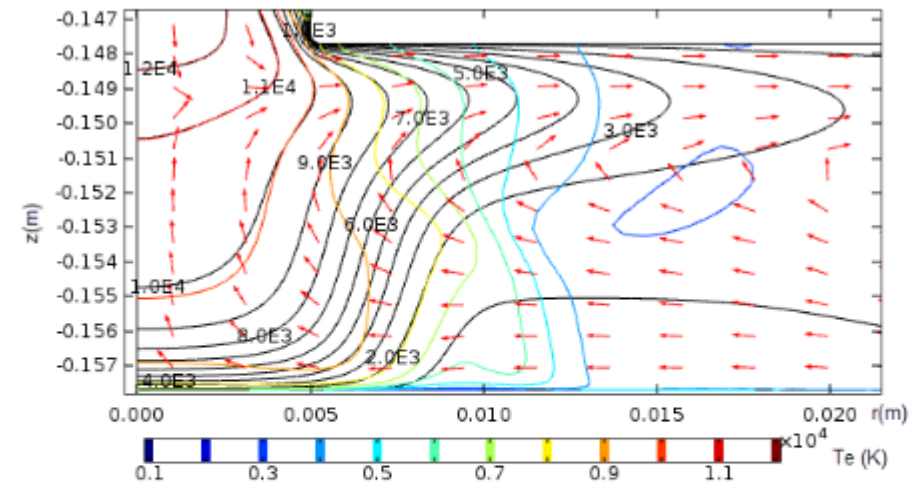
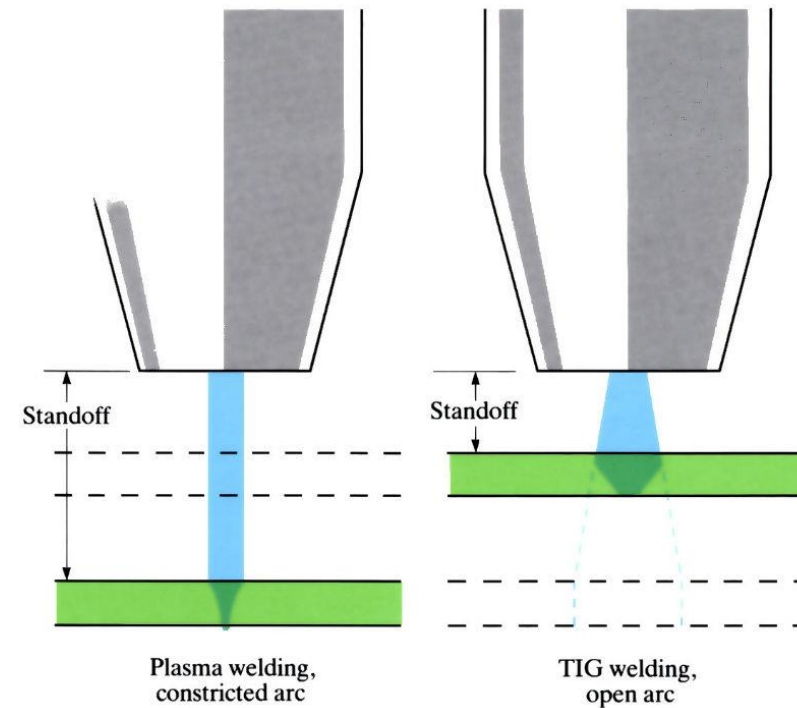
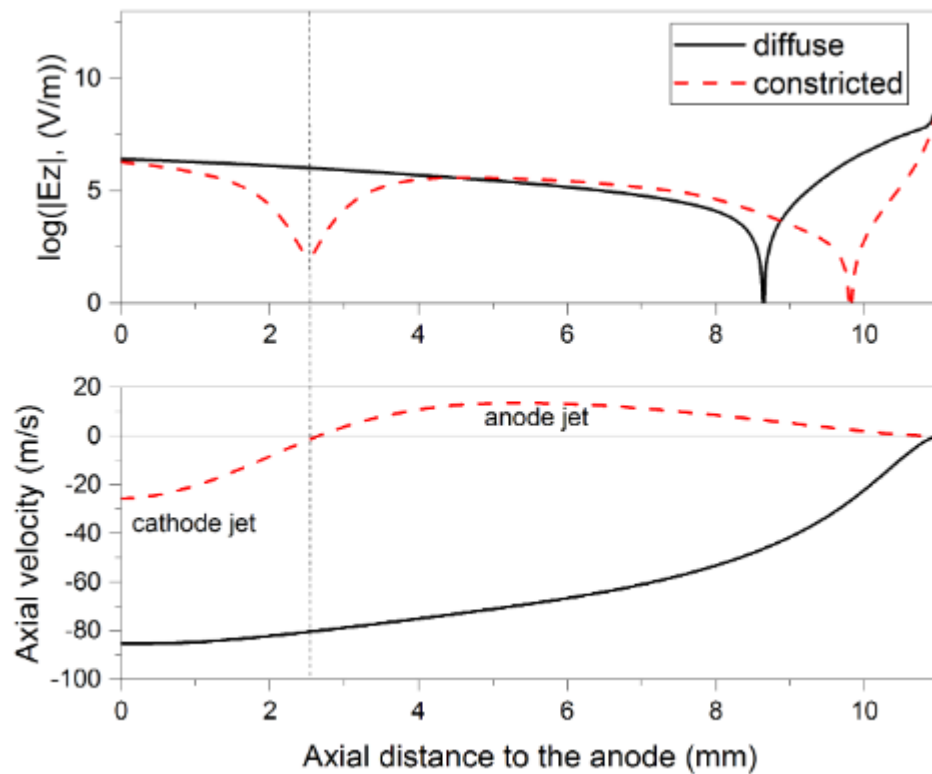


Figure 14. Iso-lines of temperatures in kelvin of heavy particles (black) and electrons (coloured) and normalized arrow indicators of the gas flow in the anode region of the arc at a gas flow rate of 1.3 slpm and an arc current of 200 A.

Αριθμητικά αποτελέσματα



Αριθμητικά αποτελέσματα

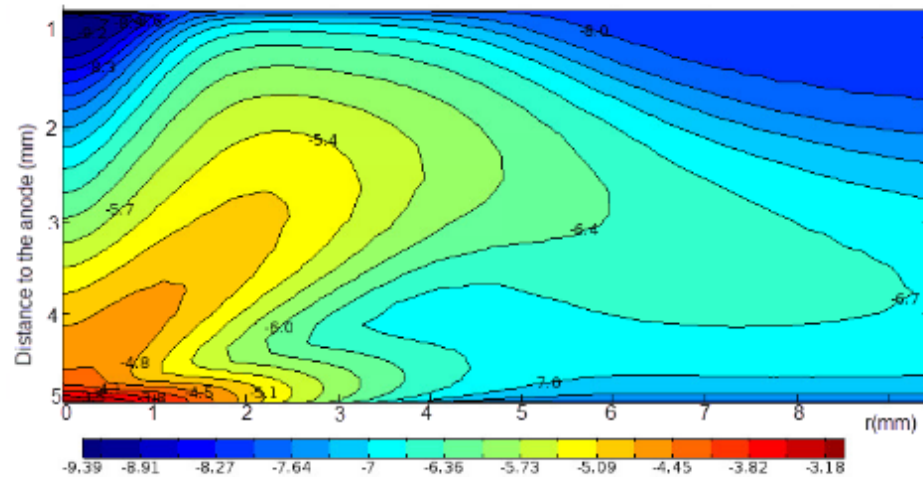


Figure 16. Mass fraction of iron atoms in the arc plasma at an arc current of 150 A and an inter-electrode distance of 5 mm. The presentation is in a logarithmic scale.

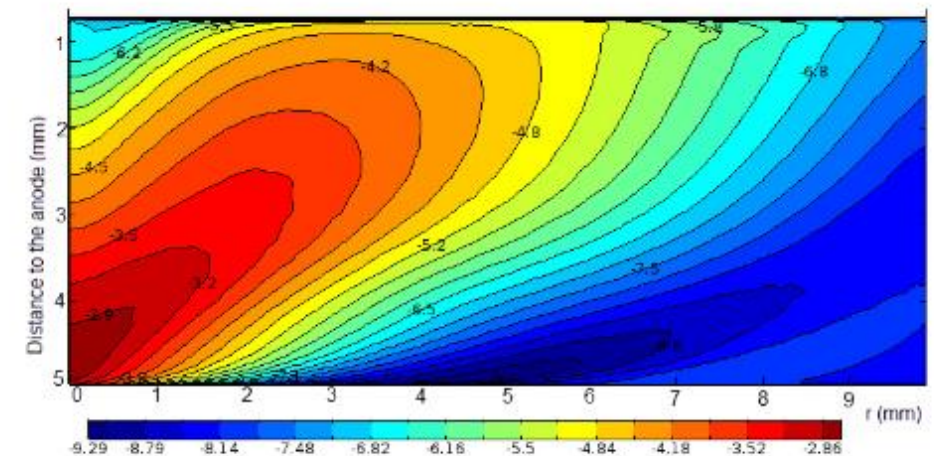


Figure 17. Mass fraction of iron ions in the arc plasma at an arc current of 150 A and an inter-electrode distance of 5 mm. The presentation is in logarithmic scale. The presentation is in a logarithmic scale.

Ερωτήσεις - Απορίες