



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Βιβλιογραφική ανασκόπηση  
σχετικά με τη δημιουργία τηγμάτων λόγω  
ηλεκτρικού τόξου και τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ιωάννης Ε. Γρηγοράκης

**Επιβλέπων :** Περικλής Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2008





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Βιβλιογραφική ανασκόπηση  
σχετικά με τη δημιουργία τηγμάτων λόγω  
ηλεκτρικού τόξου και τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ιωάννης Ε. Γρηγοράκης

**Επιβλέπων :** Περικλής Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Μάρτιο 2008

.....  
Π. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ν. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ιωάννης Ε. Γρηγοράκης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός  
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης Ε. Γρηγοράκης, 2008  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Πίνακας περιεχομένων

### **Μέρος 1<sup>ο</sup>**

	<b>Σελίδα</b>
<b><u>Διάκριση μεταξύ τηγμάτων λόγω ηλεκτρικού τόξου και τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς</u></b>	<b>3</b>
Πρόλογος	3
Περίληψη	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή	6
2. Προτεινόμενες μέθοδοι διάκρισης μεταξύ τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς και λόγω τόξου	13
2.1. Μικροσκοπικές μέθοδοι	15
2.2. Μέθοδοι φασματοσκοπίας Raman και μικροανάλυσης ακτίνων X	25
2.3. Μέθοδοι AES,SIMS και ESCA	28
3. Σχόλια	44
4. Συμπεράσματα	47

### **Μέρος 2<sup>ο</sup>**

<b><u>Η δημιουργία τηγμάτων αλουμινίου και η θερμοκρασία τους κατά την πρόσκρουση στο έδαφος</u></b>	<b>49</b>
Σημείωση	51

Υπολογισμοί	57
Βιβλιογραφία	63

### Πίνακας εικόνων και πινάκων

Εικόνα 1	8
Εικόνα 2	8
Εικόνα 3	9
Εικόνα 4	9
Εικόνα 5	10
Εικόνα 6	11
Εικόνα 7	12
Εικόνα 8	15
Εικόνα 9	17
Εικόνα 10	22
Πίνακας 1	24
Εικόνα 11	27
Εικόνα 12	31
Εικόνα 13	33
Εικόνα 14	35
Εικόνα 15	36
Εικόνα 16	56
Πίνακας 2	57

# ΜΕΡΟΣ 1<sup>ο</sup>

## Διάκριση μεταξύ τηγμάτων λόγω ηλεκτρικού τόξου και τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς

Το 1<sup>ο</sup> μέρος παρουσιάζει την άποψη του Babrauskas, V. περί διάκρισης μεταξύ τηγμάτων λόγω τόξου και τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς και βασίζεται στη δημοσίευση του: Babrauskas, V., Fires due to Electric Arcing : Can "Cause" Beads Be Distinguished from "Victim" Beads by Physical or Chemical Testing? pp. 189-201 in Fire and Materials 2003, Interscience Communications Ltd., London (2003)

## Πρόλογος

Η εργασία αυτή αφορά τη δημιουργία τηγμάτων από τους αγωγούς κατά την εκδήλωση πυρκαγιών, που συχνά χρησιμοποιούνται ως τεκμήρια για την απόδειξη ή μη ότι η πυρκαγιά οφείλεται σε ηλεκτρικά αίτια. Πρόκειται για μια βιβλιογραφική ανασκόπηση που εντάσσεται στο γενικότερο ερευνητικό αντικείμενο(θεωρητικό και πειραματικό) από τους καθηγητές μου Π. Δ. Μπούρκα και Κ. Γ. Καραγιαννόπουλο. Από τη θέση αυτή θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Π. Δ. Μπούρκα που μου ανέθεσε την εργασία αυτή.

## Περίληψη

Μία μεγάλη ποικιλία φυσικών ή χημικών μεθόδων εξέτασης έχει προταθεί για τη διαφοροποίηση μεταξύ ενός τήγματος οφειλόμενου σε ηλεκτρικό τόξο που προκάλεσε μία φωτιά έναντι ενός που προκλήθηκε από φωτιά. Όλες οι μέθοδοι θεωρούν ανεπιφύλακτα ότι υπάρχει κάποια κατηγορηματική διαφορά ανάμεσα στα 2 αυτά είδη τήγματος. Μία εξάπλωση της φωτιάς στο χώρο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν μπορούμε να ισχυριστούμε κατηγορηματικά ότι είναι διαφορετικές οι θερμικές ή χημικές διεργασίες σε αυτές τις 2 περιπτώσεις. Επιπλέον, οι περισσότερες προτεινόμενες μέθοδοι μελέτης του θέματος βασίζονται σε υποκειμενικά ποιοτικά κριτήρια για τη διάκριση των τηγμάτων που προκάλεσαν ή όχι μία φωτιά. Σημειώνεται ότι οι μελέτες αυτές έχουν βασιστεί σε μικρό αριθμό δειγμάτων και ότι καμία από τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν δεν έχει αναπαραχθεί επιτυχώς σε εργαστήρια πέρα αυτών των υποστηρικτών τους, ενώ αρκετές έχει αποδειχθεί ρητά ότι δεν είναι δυνατόν να αναπαραχθούν. Κατά συνέπεια, παρά τη βοήθεια στη διερεύνηση μίας φωτιάς που πιθανόν να δινόταν, πρέπει να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι καμία από τις προτεινόμενες μεθόδους δεν είναι ελπιδοφόρα.

Λέξεις κλειδιά : τήγματα, φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger, ηλεκτρικά τόξα, διερεύνηση φωτιάς, επιστήμη πραγματογνωμοσύνης, μικροσκοπία, φασματοσκοπία Raman.

## Abstract

A wide variety of physical or chemical testing methods have been proposed for differentiating between an electric arc bead that caused a fire, versus one that was caused by the fire itself. The methods all implicitly assume that there is some categorical difference between these two types of arc beads. A consideration of the room fire process leads to the conclusion that the thermal or chemical histories in these two cases cannot be claimed to be categorically different. Furthermore, most of the proposed methods only entail subjective, qualitative criteria for distinguishing between beads that did or did not start a fire. Finally, all of the methods have been based on studies where only a small number of specimens were tested; none of the methods have been successfully reproduced in laboratories other than the proponent's, while several have been shown explicitly not to be reproducible. Thus, despite the help to fire investigations that would be possible if a reliable method could be produced, it must be concluded that none of the proposed methods are promising.

Keywords: arc beads, Auger electron spectroscopy, electric arcs, fire investigation, forensic science, microscopy, Raman spectroscopy.

## 1. Εισαγωγή

Ένα ηλεκτρικό τόξο μεταξύ 2 ρευματοφόρων αγωγών εμφανίζει κάποιες εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Η εικόνα 1 δείχνει ότι τα τόξα παρουσιάζουν θερμοκρασίες τουλάχιστον 5700 °C, με τις πολύ μεγάλες θερμοκρασίες να παρουσιάζονται όσο αυξάνεται το ρεύμα στο τόξο[1]. Εάν εμφανιστεί ένα τόξο και υπάρχουν τα κατάλληλα εύφλεκτα υλικά, μπορεί να προκληθεί φωτιά. Εφόσον η θερμοκρασία ενός ηλεκτρικού τόξου είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης του χαλκού(1085 °C) ή του αλουμινίου(660 °C), μέρη από τον αγωγό μπορεί να λειώσουν σε μία τέτοια κατάσταση. Μόλις πραγματοποιηθεί η ψύξη, το τηγμένο υλικό παίρνει μία κατά προσέγγιση σφαιρική μορφή(εικόνα 2, εικόνα 3,εικόνα 4) και συνεπώς αυτή η επαναστεροποιημένη ζώνη καλείται τήγμα λόγω τόξου. Εντούτοις, η μορφή της δεν είναι απαραίτητα σφαιρική(εικόνα 5). Στην έρευνα των αιτιών μιας πυρκαγιάς, τα τήγματα τόξου είναι συνήθως πολυάριθμα, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια είναι διαθέσιμη στα περισσότερα σπίτια που πλήττονται από φωτιά και αν η πυρκαγιά έχει μεγάλη έκταση, είναι πιθανό να κάψει την καλωδίωση σε τέτοιο βαθμό ώστε να σχηματιστούν βραχυκυκλώματα. Μία μόνο φωτιά μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία μεγάλου αριθμού τηγμάτων τόξου με αυτόν τον τρόπο και τέτοια τήγματα μπορούν να αποκαλούνται τήγματα λόγω πυρκαγιάς. Αντιθέτως, εάν μία φωτιά προκλήθηκε επειδή ένα ηλεκτρικό σφάλμα παρήγαγε τόξο, τα τήγματα που προκλήθηκαν με τον τρόπο αυτό μπορούν να αποκαλούνται τήγματα λόγω τόξου και σχετίζονται άμεσα με τη δημιουργία της φωτιάς.

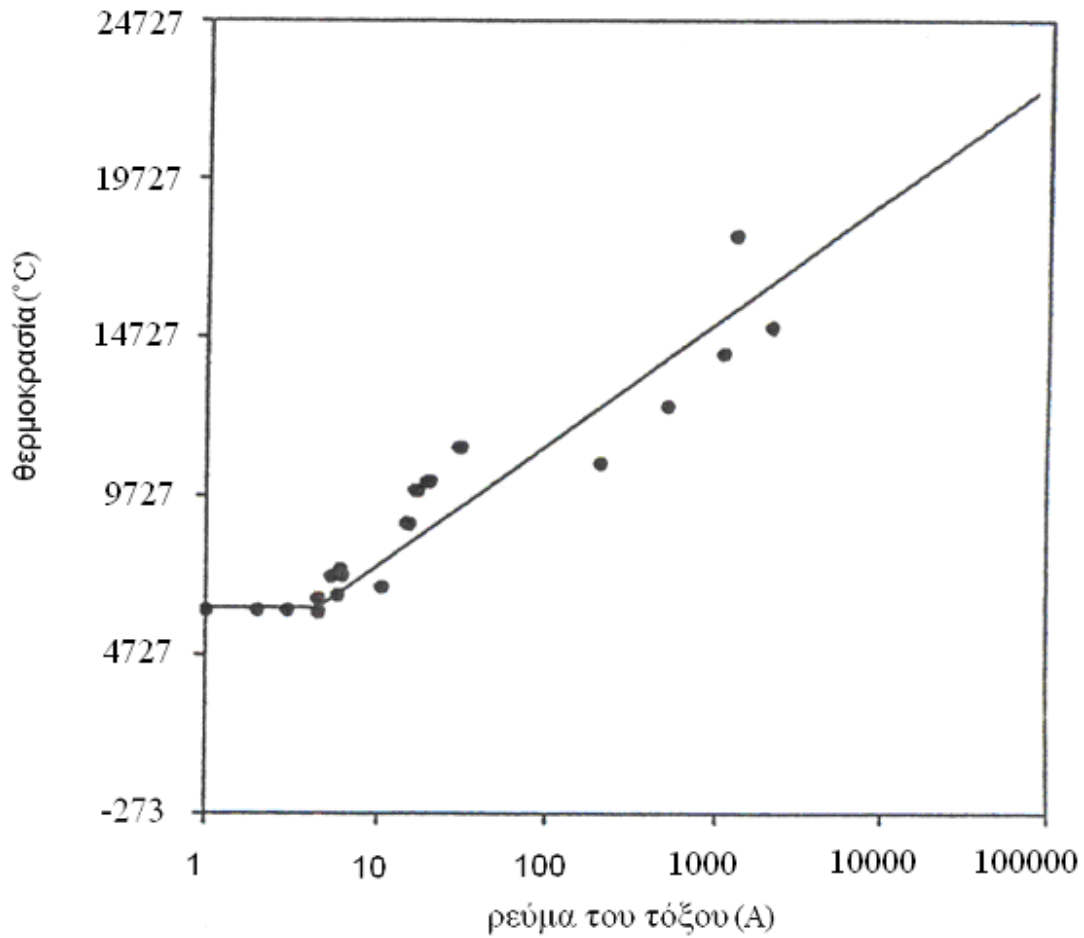
Σχόλια επί των ανωτέρω:

*Η αναφορά του συγγραφέα σχετικά με το σχηματισμό βραχυκυκλωμάτων είναι εσφαλμένη, και είναι πιθανό να αναφερόταν σε διαρροές. Διαφορετικά ο σχηματισμός βραχυκυκλωμάτων θα είχε ως συνέπεια την τήξη των ασφαλειών στις κατοικίες που πλήττονται από πυρκαγιά. Αυτό αναφέρεται πολλές φορές στο κείμενο και είναι λανθασμένο. Επιπλέον υπάρχει ασάφεια σχετικά με την μορφή του τήγματος, καθώς αναφέρεται ότι είναι σφαιρική, ενώ μετά το αναιρεί.*

Η κρυσταλλική δομή του χαλκού μεταβάλλεται με τη θέρμανση. Αν δεν υποστεί θέρμανση σε θερμοκρασίες άνω των 300 °C περίπου, το καλώδιο χαλκού παρουσιάζει λεπτές διαμήκεις ραβδώσεις που προκλήθηκαν από την διαδικασία συρματοποίησης [2]. Όταν θερμανθεί όμως σε υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμοκρασίες άνω των 800 °C), παρουσιάζει ανακρυστάλλωση λεπτών ινών, ακολουθούμενη από το σχηματισμό κάποιων δομών μεγάλων ινών. Ο διαχωρισμός των τηγμάτων από το υλικό που έχει λειώσει από τη φωτιά μπορεί να γίνει με οπτική ή μικροσκοπική εξέταση. Τα σημάδια της τήξης λόγω φωτιάς συχνά καλούνται σφαιρίδια, για να διακρίνονται από τα τήγματα.

Σχόλια επί των ανωτέρω:

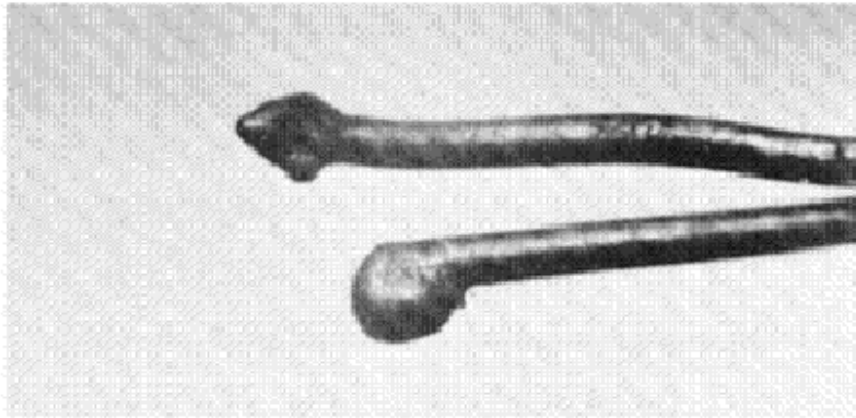
*Υπάρχει ασάφεια στο κείμενο, καθώς τα τήγματα προέρχονται και από φωτιά(τήγματα λόγω πυρκαγιάς) και επόμενως δεν επισημαίνεται η διαφορά τους από τα σφαιρίδια. Η ασάφεια αυτή παρουσιάζεται και άλλες φορές στο κείμενο.*



**Εικόνα 1** Θερμοκρασία ενός ηλεκτρικού τόξου σε συνάρτηση του ρεύματος του τόξου(τα σημεία αντιστοιχούν στα πειραματικά δεδομένα και η συνεχής γραμμή στη συσχέτιση)

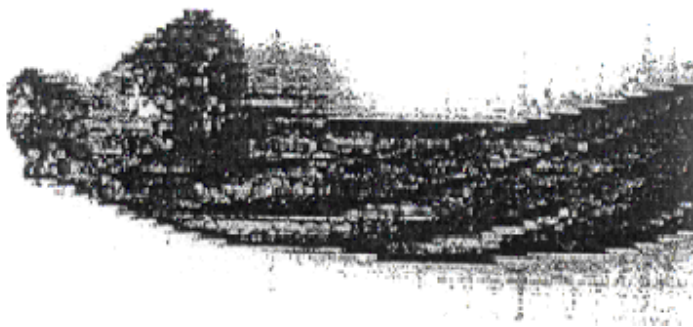


**Εικόνα 2** Τήγμα που δημιουργήθηκε από σχηματισμό τόξου σε εργαστήριο- όψη της εγκάρσιας διατομής του. (Έρευνα του Yasuaki Hagimoto)



**Εικόνα 3** Τήγματα εξαιτίας ηλεκτρικού τόξου σε χάλκινους αγωγούς  
(Ερευνα του Bruce Ettlring)

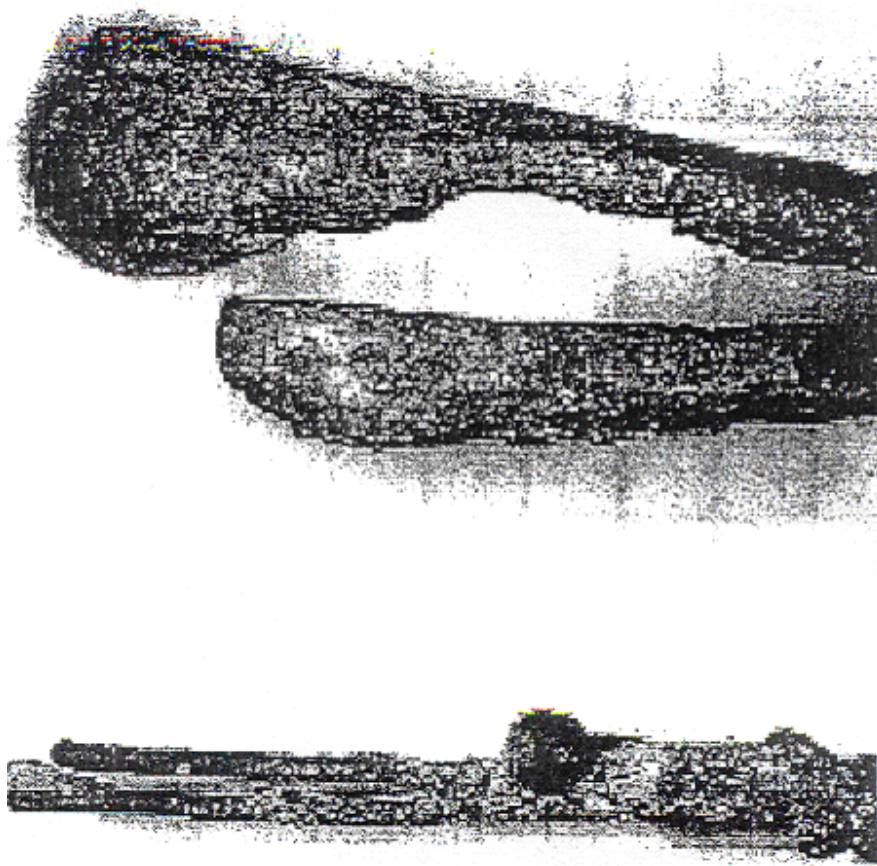
Οπτικά, τα τήγματα έχουν γενικά μία ακριβή οριοθέτηση μεταξύ ενός κατά προσέγγιση σφαιρικού τήγματος και του κυλινδρικού μέρους του αγωγού, ενώ αγωγοί τηγμένοι λόγω φωτιάς (εικόνα 6) δεν παρουσιάζουν έντονη μετάβαση μεταξύ τηγμένου/επαναστερεοποιημένου και άθικτου υλικού[3].



**Εικόνα 4** Τήγμα λόγω πυρκαγιάς προερχόμενο από πραγματική φωτιά.  
(Ερευνα του Yasuaki Hagimoto)

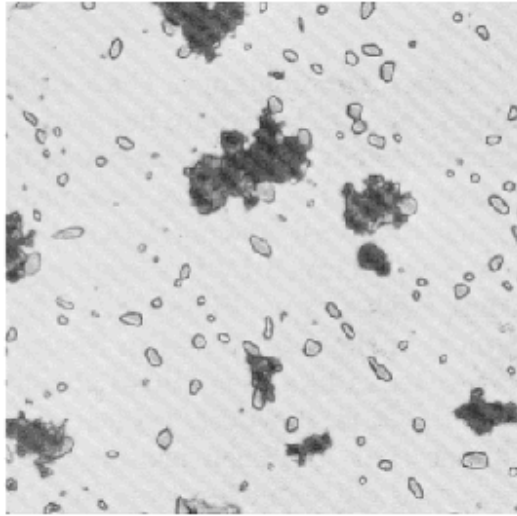


**Εικόνα 5** Τήγματα οφειλόμενα σε τόξο με ακανόνιστη μορφή (επιτεύχθηκε σε εργαστηριακή δοκιμή με τη δημιουργία άμεσης επαφής μεταξύ μη μονωμένων αγωγών που μετέφεραν εναλλασσόμενη τάση 240 V)  
(Έρευνα του David Reiter)



**Εικόνα 6** Δείγματα από τήγματα λειωμένου χάλκινου καλωδίου που προκλήθηκαν από την έκθεση σε φωτιά χωρίς σχηματισμό τόξου(Έρευνα του Yasuaki Hagimoto)

Ο Shawn[4] πρότεινε ότι, όταν εξετάζονται με μικροσκόπιο, τα τήγματα παρουσιάζουν μία πολύ πιο λεπτή και λεία δομή κόκκου από ότι οι αγωγοί που τήκονται εξαιτίας θερμότητας που οφείλεται αποκλειστικά σε φωτιά. Όμως διαψεύστηκε από τον Levinson[5], ο οποίος επισήμανε ότι ο χαλκός όταν τήκεται με την παρουσία οξυγόνου εμφανίζει μία δομή από ανόθευτους κόκκους χαλκού διάσπαρτους με υλικό που περιέχει οξυγόνο, ανεξάρτητα από το ποια ήταν η αιτία της τήξης(εικόνα 7).



**Εικόνα 7** Παρουσίαση της δομής που εμφανίζει ο χαλκός όταν τήκεται παρουσία οξυγόνου (Έρευνα του David Levinson)

Ο Singh[6] πρότεινε ότι, αν παρουσιαζόταν και δημιουργία ηλεκτρικού τόξου, θα υπήρχε μία επικείμενη δημιουργία δομής κόκκου  $\text{CuO}$  ή  $\text{Cu}_2\text{O}$  κοντά στο τέλος του τόξου, της οποίας το μέγεθος θα ελαττωνόταν σταδιακά, για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο αυτό. Αντιθέτως, εάν το καλώδιο ήταν εκτεθειμένο σε φωτιά και δεν σχηματιζόταν ηλεκτρικό τόξο, θα υπήρχαν διαφορετικές δομές κόκκου κατά μήκος αυτού, χωρίς κάποια κλίση να εμφανίζεται συστηματικά. Ο Takaki[2] πραγματοποίησε πιο λεπτομερή πειράματα και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα τήγματα τόξων παρουσιάζουν συνήθως τρεις περιοχές: (1) ένα επιφανειακό στρώμα που περιέχει πολυάριθμα κενά, (2) ένα ενδιάμεσο στρώμα που δεν τήκεται, αλλά μπορεί να επανακρυσταλλωθεί και (3) ένα βαθύ στρώμα όπου το υλικό ούτε τήκεται ούτε επανακρυσταλλώνεται (εικόνα 8). Αντιθέτως, τα τήγματα που προέρχονται λόγω φωτιάς τείνουν να είναι ομοιόμορφα επανακρυσταλλωμένα. Ο Ettl[7] επισήμανε ότι δεν υπάρχει απλός

κανόνας που να καλύπτει όλες τις περιπτώσεις, αλλά περιέγραψε ένα αριθμό από άλλες ποιοτικές διαφορές που μπορούν να βοηθήσουν στη διάκριση μεταξύ της δημιουργίας τήγματος λόγω ηλεκτρικού τόξου από αυτήν λόγω φωτιάς. Αυτή η δημοσίευση θα εστιάσει αποκλειστικά στα τήγματα προερχόμενα από τόξα στους χάλκινους αγωγούς που χρησιμοποιούνται σε καλωδίωση διακλαδιζόμενων κυκλωμάτων. Τα τήγματα τα οφειλόμενα σε τόξο σε καλωδίωση αλουμινίου συνήθως δεν αντέχουν σε θερμοκρασίες μιας πυρκαγιάς δωματίου, ενώ δεν έχει γίνει αξιοσημείωτη έρευνα όσον αφορά τήγματα λόγω τόξων σε καλώδια με μεγάλη διάμετρο, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στο χώρο των κεντρικών εγκαταστάσεων ενός κτιρίου. Τα καλώδια που είναι επικασσιτερωμένα ή επικαλυμμένα με καλά συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα καλώδια συμπαγούς χαλκού και δεν θα εξεταστούν επίσης.

Σχόλια επί των ανωτέρω:

*Υπάρχει ασάφεια, καθώς αν και αρχικά τα τήγματα αναφέρονται στο κείμενο ως τήγματα τόξων και διαχωρίζονται από τα σφαιρίδια, τα οποία προέρχονται από φωτιά, στην παράγραφο αυτή τα τήγματα διαχωρίζονται σε τήγματα τόξων και τήγματα λόγω πυρκαγιάς, το οποίο είναι οξύμωρο.*

## 2. Προτεινόμενες μέθοδοι διάκρισης μεταξύ τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς και λόγω τόξου

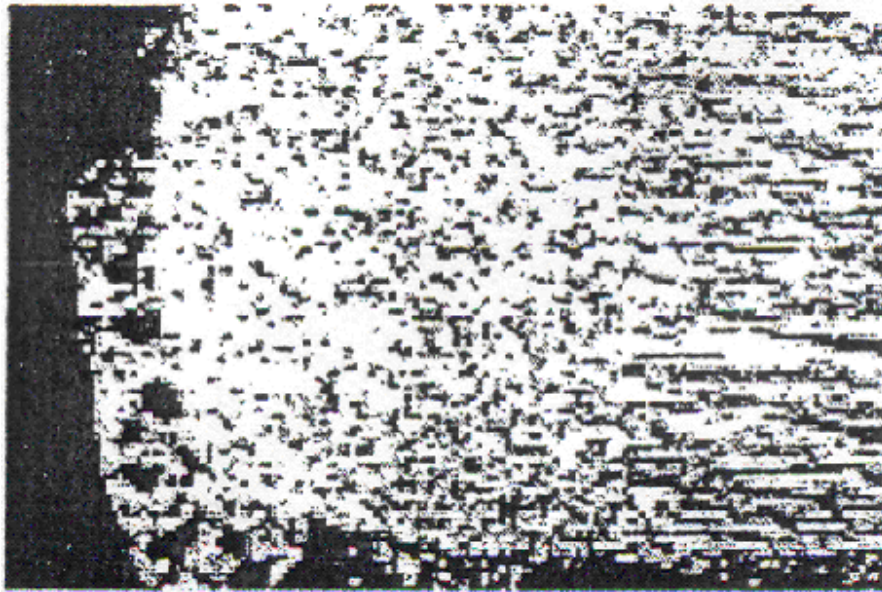
Στην περίπτωση που το χαρακτηριστικό της τήξης σε ένα αγωγό οφείλεται στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου και όχι εξαιτίας μιας φωτιάς, ερευνητές και πραγματογνώμονες έχουν ερευνήσει την άποψη ότι οι δύο τύποι ηλεκτρικών τόξων, -τήγματα λόγω τόξου και λόγω πυρκαγιάς-, μετά

από μία φωτιά μπορεί να διακριθούν μεταξύ τους με κάποιους τρόπους φυσικής ή χημικής εξέτασης. Εάν μπορούσε να καταδειχθεί ότι ένα συγκεκριμένο τήγμα είναι το υπόλειμμα ενός ηλεκτρικού τόξου το οποίο προκάλεσε τη φωτιά, αυτό μπορεί να καταστήσει δυνατό να επισημανθεί η αιτία μιας φωτιάς, η οποία διαφορετικά θα ήταν απροσδιόριστη. Η απλή οπτική παρατήρηση δεν είναι επαρκής για το σκοπό αυτό, από τότε που δύο Ιαπωνικές μελέτες[8, 9] έδειξαν ότι τα ακόλουθα χαρακτηριστικά γνωρίσματα δεν παρουσιάζουν διαφορές ανάμεσα στα τήγματα λόγω τόξου και λόγω πυρκαγιάς, ακόμη και όταν τα προηγούμενα δεν υποβλήθηκαν στη φωτιά που επακολούθησε :

- στιλπνότητα του τήγματος
- χρώμα του τήγματος
- σχήμα του τήγματος
- ομαλότητα ή τραχύτητα της επιφάνειας
- μέγεθος του τήγματος (αν και τα πολύ μικρότερα από 1 mm τήγματα συνήθως είναι τήγματα λόγω τόξου, ενώ τα μεγαλύτερα από 3 mm, τήγματα λόγω πυρκαγιάς)

Κατά συνέπεια, έχει προταθεί ένας αριθμός τεχνικών ανάλυσης βασισμένες στη χρήση οργάνων, οι οποίες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

- (i)μικροσκοπία
- (ii)φασματοσκοπία Raman και μικροανάλυση ακτίνων X
- (iii)Φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger (Auger electron spectroscopy-AES) και φασματοσκοπία μάζας δευτερογενών ιόντων(secondary ion mass spectrometry-SIMS)



**Εικόνα 8** Τήγμα τόξου το οποίο δείχνει τις τρεις μεταλλογραφικές ζώνες (επιφανειακά, ενδιάμεσα και βαθύτερα στρώματα)(Έρευνα του Akira Takaki)

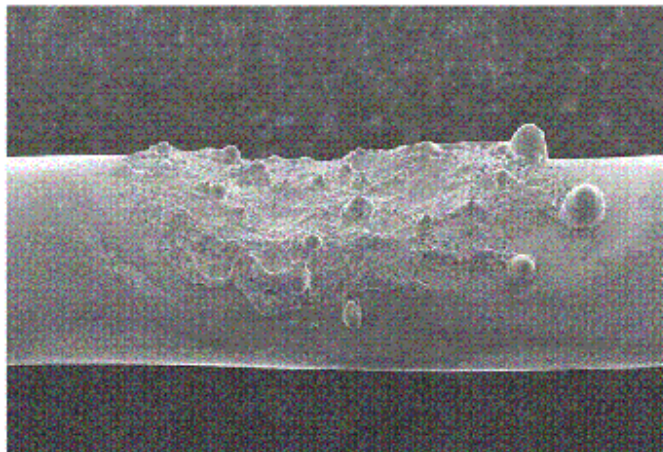
## 2.1. Μικροσκοπικές μέθοδοι

Οι απλούστερες προτεινόμενες μέθοδοι υποστηρίζουν ότι η εξέταση ενός τήγματος με μικροσκόπιο (μετά την προκαταρκτική προετοιμασία που μπορεί να περιλαμβάνει τον καθαρισμό ή την εγχάραξη των επιφανειών, όπως επίσης και άλλες τεχνικές για την προετοιμασία των διατομών) είναι αρκετή για να γίνει η διάκριση. Οι μέθοδοι που έχουν προταθεί για το διαχωρισμό είναι:

- (1) τα τήγματα λόγω τόξου έχουν τετράγωνα ή ορθογώνια σημάδια ουλής, ενώ τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς δεν παρουσιάζουν αυτές τις δομές.
- (2) τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς παρουσιάζουν μικρά μόρια εναποτεθειμένα στην επιφάνεια, ενώ τα τήγματα λόγω τόξου δεν τα παρουσιάζουν.
- (3) τα τήγματα λόγω τόξου έχουν μικρά κενά, ενώ τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς έχουν μεγάλα κενά.
- (4) ο αριθμός των κενών ή η περιοχή της συνολικής διατομής είναι διαφορετική στα τήγματα λόγω τόξου από τα αντίστοιχα στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς.
- (5) τα τήγματα λόγω τόξου έχουν ένα μικρό κενό σκέλους δενδρίτη, ενώ τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς έχουν ένα μεγάλο κενό.
- (6) βασιζόμενες στην εξέταση μεγάλων τμημάτων καλωδίου και όχι μόνο τμημάτων, εάν μεγάλα τμήματα είναι ομοιόμορφα επανακρυσταλλωμένα το καλώδιο έχει υποστεί ηλεκτρική υπερθέρμανση. Αυτό βέβαια δεν υποδεικνύει αυτόματα την κατάσταση στην οποία βρίσκεται (λόγω τόξου ,λόγω πυρκαγιάς), αλλά μπορεί να συμβάλλει στην αξιολόγηση της σειράς των γεγονότων που διαδραματίζονται.

Η μέθοδος 1 προτάθηκε από τον Gray και τους συνεργάτες του [10] το 1983. Παρουσίασαν αποτελέσματα από μία τυχαία φωτιά και πραγματοποίησαν μερικά(αλλά προφανώς μόνο μερικά) πειράματα στο εργαστήριο σε εύκαμπτα , μονωμένα με PVC διπολικά καλώδια με τη διέλευση ρεύματος πολύ μεγάλης εντάσεως μέσω του καλωδίου μέχρι αυτό να βραχυκυκλωθεί και να γίνει ανάφλεξη (παράγοντας τήγματα λόγω τόξου)

καθώς επίσης με τη θέρμανση σε φωτιά ενός διπολικού καλωδίου που διαρρέοταν από ρεύμα κανονικής λειτουργίας μέχρι την ανάφλεξή του (παράγοντας τήγματα λόγω πυρκαγιάς). Έπειτα εξέτασαν κομμάτια από τα τήγματα με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ανίχνευσης(scanning electron microscope-SEM)(εικόνα 9) και, βάσει των χαρακτηριστικών που παρατηρήθηκαν, πρότειναν ότι τα τήγματα λόγω τόξου παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό από τετράγωνα ή ορθογώνια σημάδια ουλής, ενώ τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς παρουσιάζουν λίγα ή καθόλου. Δεν ήταν ξεκάθαρο αν τα σημάδια ουλής που παρατηρήθηκαν αντιπροσώπευαν προσμίξεις ή απλώς περιοχές κρυστάλλωσης, ωστόσο κανένας άλλος ερευνητής δεν έχει αναφέρει ότι παρατήρησε αυτά τα χαρακτηριστικά, οπότε πιθανώς αυτά να οφείλονται σε κάποιο σπάνιο συνδυασμό καταστάσεων, παρά να είναι ένα σύνηθες χαρακτηριστικό των τηγμάτων λόγω τόξου.



**Εικόνα 9** Φωτογραφία τηγμάτων λόγω τόξου με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ανίχνευσης(SEM)(Ερευνα των D. Galler και T. J. Klem)

Η μέθοδος 2 μελετήθηκε από τους Erlandsson και Strand [11]. Σε μια σειρά πειραμάτων, δημιούργησαν βραχυκυκλώματα μεταξύ αγωγών χαλκού, και έπειτα εξέθεσαν τα καλώδια σε μία φωτιά που τροφοδοτήθηκε με ξύλο και PVC, το τελευταίο με σκοπό να προσομοιώσει την μόνωση του καιόμενου καλωδίου. Σε μια άλλη σειρά πειραμάτων, δημιούργησαν το βραχυκύκλωμα μέσα στο περιβάλλον της φωτιάς. Τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς, όταν εξετάστηκαν με SEM, παρουσίασαν στην επιφάνεια τους μία σχεδόν ομοιόμορφη διασπορά μικρών σωματιδίων μεγέθους 2 μm περίπου. Συμπληρωματικές μελέτες έδειξαν ότι σωματίδια τέτοιου τύπου μπορούν επίσης να έχουν δημιουργηθεί όταν σχηματιζόταν ηλεκτρικό τόξο σε ατμόσφαιρα που περιείχε καθαρούς ατμούς HCl, οι οποίοι παρήχθησαν με την εξάτμιση υγρού HCl και όχι με την καύση PVC. Αντίθετα, στα τήγματα που δημιουργήθηκαν από το σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου μεταξύ γυμνών αγωγών απουσίαζαν μικρά σωματίδια της επιφάνειας, πριν την έκθεση τους σε φωτιά τροφοδοτούμενη από ξύλο και PVC. Δυστυχώς, η συνθήκη της τελευταίας δοκιμής δεν ανταποκρίνεται στη δημιουργία των τηγμάτων λόγω τόξου. Όταν οι συγγραφείς δημιούργησαν πραγματικά τήγματα λόγω τόξου βραχυκυκλώνοντας μονωμένα καλώδια (με το να αποκόπτουν μικρά μόνο κομμάτια της μόνωσης), βρήκαν ότι οι επιφάνειες των τηγμάτων περιείχαν μικρά σωματίδια που δεν διαφέρανε από τα αντίστοιχα στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς.

Σχόλια επί των ανωτέρω:

*Γίνεται πάλι εσφαλμένη αναφορά για βραχυκυκλώματα μεταξύ αγωγών χαλκού, όπως επίσης και στις επόμενες παραγράφους. Επίσης υπάρχει ασάφεια όσον αφορά τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μελέτες.*

Ένας αριθμός επιστημόνων ερεύνησαν τα κενά στα τήγματα ως ένα τρόπο διαχωρισμού τους. Οι Erlandsson και Strand [11] μελέτησαν τις διατομές των τηγμάτων που δημιουργήθηκαν με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους. Βρήκαν ότι σε ατμοσφαιρικό αέρα, τα τήγματα τόξων παρουσίαζαν πολλά κενά αλλά τα τήγματα που δημιουργήθηκαν από την τήξη του χαλκού λόγω ρεύματος μεγάλης έντασης δεν παρουσίαζαν κενά. Σε μία αναγωγική ατμόσφαιρα (φλόγα αερίου), βρήκαν ότι υπήρχε μικρότερος αριθμός, αλλά μεγαλύτερων σε μέγεθος, κενών, ανεξάρτητα με το αν τα τήγματα δημιουργήθηκαν λόγω ηλεκτρικού τόξου ή τήξης. Επιπλέον παρατήρησαν ότι όταν τα πειράματα διαδραματίζονταν σε αέρα, μπορεί να παρουσιαστεί μία "σφήνα οξειδίου" μεταξύ του τηγμένου και του άτηκτου υλικού, το οποίο δεν συμβαίνει σε αναγωγική ατμόσφαιρα. Η πυροσβεστική υπηρεσία του Τόκιο [12] πραγματοποίησε πειράματα που έδειξαν ότι, εν αντιθέσει με τα ευρήματα των Erlandsson και Strand, μπορούσαν να δημιουργηθούν κενά όταν τα τήγματα χαλκού σχηματίζονταν σε ατμοσφαιρικό αέρα εξαιτίας της τήξης λόγω ρεύματος μεγάλης έντασης. Δημιούργησαν τήγματα με την τήξη καλωδίων με μεγάλης έντασης ρεύματος, σε αέρα και σε ατμόσφαιρες N<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε ένα σωληνοειδή φούρνο με ελεγχόμενη τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σχεδόν πάντα εμφανίζονταν κενά όταν τα τήγματα σχηματίζονταν στον αέρα στους 1000 °C, αλλά σχεδόν ποτέ σε N<sub>2</sub> ή CO<sub>2</sub> στην ίδια θερμοκρασία.

Η μέθοδος 3 μελετήθηκε σε μικρό βάθος από την πυροσβεστική υπηρεσία του Τόκιο[12]. Με βάση τις περιορισμένες πειραματικές δοκιμές, παρατήρησαν ότι τα κενά στα τήγματα λόγω τόξου είναι μικρότερα από αυτά στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς. Συμπέραναν λοιπόν ότι τα κενά στα

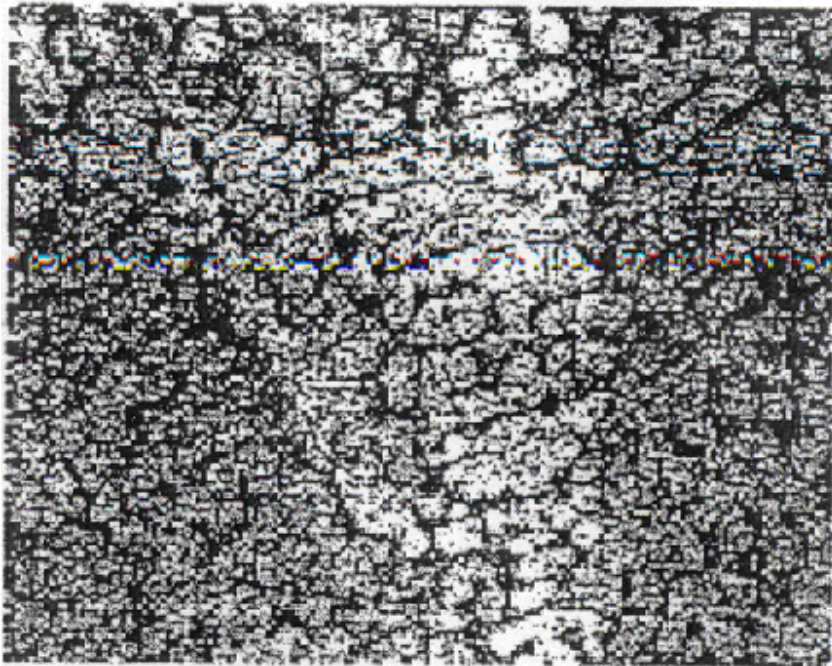
τήγματα λόγω τόξου είναι πιθανότερο να βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, ενώ στα τήγματα λόγω τόξου βαθιά στο εσωτερικό. Θεώρησαν ο λόγος είναι ότι τα τήγματα λόγω τόξου έχουν την τάση να στερεοποιούνται πιο γρήγορα και το οξυγόνο έχει μικρότερη πιθανότητα να διαχυθεί βαθιά στο εσωτερικό, ενώ τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς στερεοποιούνται πιο αργά και τα κενά κοντά στην επιφάνεια έχουν την τάση να μεταναστεύουν στο εσωτερικό και να συγκεντρώνονται μέσα σε μεγαλύτερα κενά, όπου οι θερμοκρασίες παραμένουν υψηλές. Τα πειράματά τους δεν ήταν αρκετά εκτενή έτσι ώστε να επιφέρουν στατιστικά συμπεράσματα.

Η μέθοδος 4 ερευνήθηκε από τους Ishibashi και Kishida [9], οι οποίοι εξέτασαν 15 τήγματα από φωτιές όπου ήταν γνωστό αν το τήγμα ήταν λόγω τόξου ή λόγω πυρκαγιάς. Συμπέραναν ότι η παρουσία των κενών είναι σε γενικές γραμμές μεγαλύτερη στα τήγματα λόγω τόξου από ότι στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς. Πιθανότατα αυτό συμβαίνει διότι τα τήγματα λόγω τόξου είναι πιο πιθανό να σχηματιστούν σε μια οξειδωτική ατμόσφαιρα ενώ τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς σε μια αναγωγική ατμόσφαιρα, αλλά οι διαφορές δεν υποστηρίζουν μία σταθερή διάκριση μεταξύ των 2 τύπων των τηγμάτων. Ο Mitsuhashi [13] παρήγαγε τήγματα λόγω πυρκαγιάς δημιουργώντας βραχυκυκλώματα περιορισμού του ρεύματος με ένα συνεστραμένο καλώδιο και έπειτα τοποθέτησε τα τήγματα σε ένα φούρνο επιτυγχάνοντας την έκθεσή τους σε θερμοκρασίες 400-1000 °C. Τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς παρήχθησαν αρχικά εκθέτοντας τους γυμνούς αγωγούς στη διαδικασία της θέρμανσης από το φούρνο, και έπειτα επικαλύπτοντας τους με μόνωση PVC παράγοντας ένα βραχυκύκλωμα περιορισμού ρεύματος. Ο Mitsuhashi απαρίθμησε τα μικρο-κενά (0.5-1.0 μm) για κάθε τήγμα σε τρεις περιοχές κοντά στο κέντρο και βρήκε περίπου

διπλάσιο τον αριθμό των κενών στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς από ότι στα τήγματα λόγω τόξου. Όμως επίσης απαρίθμησε τα κενά στα τήγματα λόγω τόξου τα οποία δεν είχαν εκτεθεί σε περαιτέρω θέρμανση μετά τη δημιουργία του τήγματος και σε αυτήν την περίπτωση ο αριθμός των κενών ήταν κατά προσέγγιση ίδιος με αυτόν στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς. Για την επιστήμη της πραγματογνωμοσύνης, η μέθοδος δεν έδειχνε πολλά υποσχόμενη εφόσον, ενώ ο μέσος αριθμός των κενών ήταν διαφορετικός για τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς και λόγω τόξου, οι κατανομές επικαλύπτονταν και η ίδια συγκεκριμένη συγκέντρωση κενών μπορούσε να παρουσιαστεί για κάθε μία από τις περιπτώσεις. Η μέθοδος 4 μελετήθηκε επίσης από τον Oba [14] ο οποίος παρήγαγε τήγματα λόγω τόξου και λόγω πυρκαγιάς στο εργαστήριο και σε κάθε περίπτωση, τα υπέβαλε κατόπιν σε διάφορες καταστάσεις θέρμανσης(σε φούρνο). Τυπικά, το 30-45% της περιοχής της εγκάρσιας διατομής περιλαμβάνει κενά και αυτό εξαρτάται από τη θερμοκρασία θέρμανσης που χρησιμοποιήθηκε μετά το σχηματισμό του τήγματος τόξου, όμως οι κατανομές επικαλύπτονταν έντονα και συμπέρανε ότι το ποσοστό της περιοχής κενών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέθοδος διάκρισης.

Οι μέθοδοι 3 και 4 μελετήθηκαν από τον Miyoshi [15,16], ο οποίος απαρίθμησε τα μεγάλα κενά και βρήκε ότι είχαν πολύ μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τήγματα λόγω πυρκαγιάς από ότι σε τήγματα λόγω τόξου. Στην μελέτη του, τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς δημιουργήθηκαν με την καύση ενός καλωδίου τροφοδοσίας σε ένα καυστήρα φλόγας μέχρις ότου δημιουργήθηκε βραχυκύκλωμα. Αλλά τα τήγματα λόγω τόξου δημιουργήθηκαν βραχυκυκλώνοντας ένα καλώδιο το οποίο στη συνέχεια δεν είχε τοποθετηθεί σε φωτιά και κατά συνέπεια, το πρωτόκολλό του δεν

επιχείρησε να μιμηθεί τα αποτελέσματα που προκαλούνται από μία πυρκαγιά δωματίου. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η μέγιστη διάμετρος των κενών στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς ήταν τυπικά 2-3 φορές μεγαλύτερη από ότι στα τήγματα λόγω τόξου. Ομοίως, το ποσοστό της συνολικής περιοχής κενών που καταλαμβάνονταν από κενά διαμέτρου 132 $\mu\text{m}$  ή μεγαλύτερης ήταν 14% στα τήγματα λόγω τόξου και 72% στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς. Ωστόσο, πάλι οι πραγματικές κατανομές παρουσίασαν επικάλυψη και μπορούσε να εμφανιστεί μία συγκεκριμένη κατανομή κενού είτε στα τήγματα λόγω τόξου ή στα τήγματα λόγω πυρκαγιάς, εν τούτοις με μεγαλύτερη πιθανότητα στα μεν από ότι στα δε.



**Εικόνα 10** Τήγμα χάλκινου καλωδίου που εμφανίζει κρύσταλλο με δομή δενδρίτη (Έρευνα του Yasuaki Hagimoto)

Σχόλια επί των ανωτέρω:

*Γίνεται πάλι λανθασμένη αναφορά για βραχυκυκλώματα σε καλώδια. Επίσης παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι 3 και 4 μελετήθηκαν εκτενέστερα, χωρίς να καταλήξουν ούτε αυτές σε ουσιαστικά συμπεράσματα.*

Ο Seki και οι συνεργάτες του [8] εστίασαν στην παρουσία ενός κρυστάλλου με δομή δενδρίτη (εικόνα 10) στα τήγματα τόξου. Έδειξαν ότι η γενική παρουσία ή απουσία των δενδριτών σε ένα τήγμα τόξου δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μέσο ταυτοποίησης (πίνακας 1), δεδομένου ότι απλώς απεικονίζει τη συγκέντρωση οξυγόνου στο τήγμα. Σχεδόν μηδενική συγκέντρωση O<sub>2</sub> οδηγεί σε απουσία κρυστάλλων, όπως οδηγεί και η εύτικτη συγκέντρωση 0.39% κατά μάζα. Συγκεντρώσεις O<sub>2</sub> μικρότερες από αυτή δημιουργούν πρωτογενείς κρυστάλλους Cu, ενώ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις δημιουργούν πρωτογενείς κρυστάλλους Cu<sub>2</sub>O. Όμως ο Seki και οι συνεργάτες του, μαζί με τον Lee και τους συνεργάτες του [17], πρότειναν τη μέθοδο 5 παρατηρώντας ότι, αν δημιουργόταν κρύσταλλος με δομή δενδρίτη, η απόσταση μεταξύ των βραχιόνων του δενδρίτη μεταβάλλεται με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος στην οποία το τήγμα στερεοποιείται. Σύμφωνα με τη θεωρία τους, ένα τήγμα λόγω τόξου θα στερεοποιηθεί σε θερμοκρασία κοντά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (<400 °C) και επομένως θα έχει μικρές αποστάσεις μεταξύ των βραχιόνων του δενδρίτη ενώ ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς θα στερεοποιηθεί σε θερμοκρασία αερίου φωτιάς (>400 °C) και θα παρουσιάζει μεγάλες αποστάσεις (εκτός αν υποστεί ξανά τήξη στη φωτιά). Από την άλλη μεριά, ο ρυθμός ψύξης και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος πριν το σχηματισμό του τήματος βρέθηκαν να μην έχουν επίπτωση στην απόσταση. Για να στηρίξουν τη θέση τους, οι συγγραφείς έφτιαξαν

πειραματικές καμπύλες που έδειχναν την απόσταση ως συνάρτηση τόσο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος κατά την διαδικασία της στερεοποίησης όσο και της συγκέντρωσης οξυγόνου, ξεχωριστά για δενδρίτες Cu και Cu<sub>2</sub>O. Ωστόσο, βασιζόμενοι στις φωτογραφίες τους, η αντιστοίχιση μίας συγκεκριμένης απόστασης βραχίονα δενδρίτη σε ένα συγκεκριμένο τήγμα φαίνεται να είναι πολύ υποκειμενική μέθοδος προσδιορισμού. Οι συγγραφείς διεξήγαγαν πολλές δοκιμές, αλλά η περιγραφή των αποτελεσμάτων τους δεν ξεκαθαρίζει εάν ο διαχωρισμός των τμημάτων σε τήγματα λόγω τόξου ή λόγω πυρκαγιάς ήταν επιτυχής. Σε κάθε περίπτωση, οι δοκιμές ήταν πρωτίστως εκθέσεις σε μικρή ηλεκτρική κάμινο, και δεν επιχειρήθηκε η δημιουργία τμημάτων λόγω τόξου τα οποία θα υποβάλλονταν εν συνεχεία σε φωτιά δωματίου. Η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί καθόλου εάν το τήγμα δεν παρουσιάζει κρυστάλλους με δομή δενδρίτη και, όπως φαίνεται στον πίνακα 1, τα περισσότερα τήγματα δεν παρουσιάζουν.

τήγμα	Χωρίς κρυστάλλους με δομή δενδρίτη	Με κρυστάλλους Cu με δομή δενδρίτη	Με κρυστάλλους Cu <sub>2</sub> O με δομή δενδρίτη
λόγω τόξου	57%	38%	5%
λόγω πυρκαγιάς	92%	8%	0%

**Πίνακας 1** Κρύσταλλος με δομή δενδρίτη που παρατηρήθηκε από τον Seki και τους συνεργάτες του σε δοκιμές τμημάτων τόξου.

Η μέθοδος 6 προτάθηκε από τον Levinson [5], ο οποίος παρατήρησε ότι εάν ένα μεγάλο σε μήκος κομμάτι καλωδίου παρουσίαζε ομοιόμορφη επανακρυστάλλωση, το πιθανότερο είναι να οφείλεται σε ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα, παρά σε θέρμανση από φωτιά, εφόσον η τελευταία δεν μπορεί να θερμάνει ένα καλώδιο ομοιόμορφα. Ωστόσο, ο Levinson απέφυγε προσεκτικά να ισχυριστεί ότι αυτή η διάκριση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν απόδειξη για την προέλευση της φωτιάς, εφόσον η ίδια η φωτιά μπορεί να δημιουργήσει τις συνθήκες που οδήγησαν σε ισχυρό ρεύμα.

## 2.2 Μέθοδοι φασματοσκοπίας Raman και μικροανάλυσης ακτίνων X

Βάσει ενός πολύ μικρού αριθμού δοκιμών, η πυροσβεστική υπηρεσία του Τόκιο [12] παρατήρησε ότι είναι πιθανό να βρεθεί ανθρακούχο υλικό στο εσωτερικό των τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς, αλλά όχι των τηγμάτων λόγω τόξου. Ο Masui [18] χρησιμοποίησε μικροανάλυση ακτίνων X για να εξετάσει την παρουσία άνθρακα σε τήγματα τόξου που αυτός παρήγαγε (α) προκαλώντας μια σειρά σφαλμάτων λόγω τόξου σε καλώδιο ή (β) πρώτα απανθρακώνοντας τη μόνωση του καλωδίου με ένα φλόγιστρο, και έπειτα δημιουργώντας μία σειρά από τόξα. Τα αποτελέσματά του ήταν μόνο ερευνητικά, αλλά έδειξαν μία αμελητέα ποσότητα άνθρακα στον πρώτο τύπο τήγματος, που αντιστοιχούσε σε ένα τήγμα λόγω τόξου. Η ανάλυση έδειξε ότι το δεύτερο τήγμα είχε σχεδόν τόσο υψηλή συγκέντρωση άνθρακα όσο σε ένα ελεγχόμενο δείγμα καθαρού άνθρακα. Ωστόσο, το δεύτερο είδος τήγματος, αντιπροσωπεύει μόνο μερικώς ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς, με

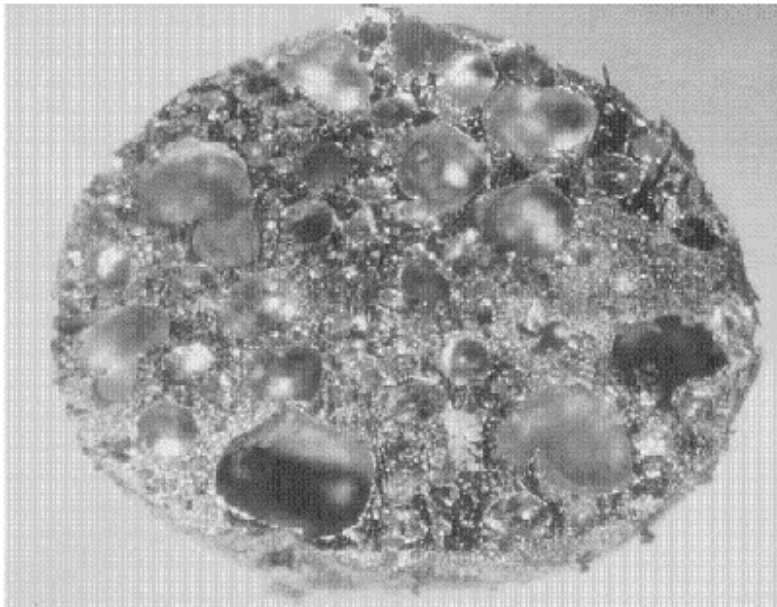
τη μόνωση να είχε υποστεί κατάκαυση πριν από το σχηματισμό του ηλεκτρικού τόξου, αλλά το τήγμα να μην εκτέθηκε στη συνέχεια σε φωτιά.

Σχόλια επί των ανωτέρω:

*Στην ανωτέρω παράγραφο παρουσιάζεται ασάφεια στον τρόπο παρουσίασης των συνθηκών της μικροανάλυσης ακτίνων Χ που έγινε στα τήγματα. Γενικά υπάρχουν τμήματα του κειμένου όπου η διαδικασία και οι συνθήκες εκτέλεσης των πειραμάτων δεν προσδιορίζονται επακριβώς.*

Ο Lee και οι συνεργάτες του [19,20] συνέχισαν αυτήν την ιδέα εξετάζοντας τη σύσταση των ανθρακούχων προσμίξεων(εικόνα 11). Δεν συνέλεξαν στοιχεία για το πόσο μέρος των τηγμάτων περιείχε ανθρακούχες προσμίξεις, αλλά μελέτησαν με φασματοσκοπία Raman τήγματα που είχαν τέτοιες προσμίξεις ώστε να τις διακρίνουν μεταξύ άμορφου και άνθρακα γραφίτη. Αυτό μπορεί να γίνει με βάση το φάσμα Raman εφόσον ο άμορφος άνθρακας παρουσιάζει μία πλατιά αιχμή στα  $1350-1360\text{ cm}^{-1}$ , ενώ ο άνθρακας γραφίτη έχει μία απότομη αιχμή στα  $1580\text{ cm}^{-1}$ . Οι συγγραφείς παρήγαγαν τήγματα λόγω τόξου και λόγω πυρκαγιάς στο εργαστήριο και βρήκαν ότι το 100% των τηγμάτων λόγω τόξου περιείχαν πάντα άμορφο άνθρακα αλλά το 27% από 60 δείγματα περιείχαν επίσης άνθρακα γραφίτη. Σε όλα τα 20 τήγματα λόγω πυρκαγιάς που εξετάστηκαν, ανιχνεύθηκε άμορφος άνθρακας ενώ σε κανένα από αυτά δε βρέθηκε άνθρακας γραφίτης. Οι συγγραφείς έπειτα εξέτασαν 8 τήγματα από πραγματικές φωτιές όπου το είδος του τήματος επιβεβαιώθηκε με άλλα μέσα. Κατάφεραν να βρουν άνθρακα γραφίτη στα 3 από τα 5 τήγματα λόγω τόξου. Υπέθεσαν ότι η επίδραση εμφανίζεται διότι το PVC μεταφέρεται σύσσωμο στο εσωτερικό ενός τήματος τόξου. Σύμφωνα με την άποψή τους, ο άνθρακας γραφίτης δημιουργείται μέσα στο τήγμα μόνο εάν η ακολουθία δημιουργίας τήματος

λόγω τόξου είναι τέτοια που η μόνωση του PVC υφίσταται αργή κατάκαυση εξαιτίας ενός ηλεκτρικού σφάλματος πριν την τελική κατάρρευση, οδηγώντας στην εμφάνιση ηλεκτρικών τόξων. Σε ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς ή λόγω τόξου όπου το σφάλμα οδηγεί ταχύτατα σε ανάφλεξη, δεν υπάρχει χρόνος για τον σχηματισμό άνθρακα γραφίτη. Τα τήγματα λόγω τόξου του τελευταίου τύπου θα εμφανιστούν όταν ένα έντονο, απότομο, υψηλής έντασης ρεύμα λιώσει τη μόνωση και προκαλέσει σε σύντομο χρονικό διάστημα ένα βραχυκύκλωμα. Δεν είναι ξεκάθαρη η άποψη των συγγραφέων ότι ο άνθρακας μεταφέρεται μέσα στο χαλκό, εφόσον δήλωσαν ότι οι θερμοκρασίες στις οποίες το PVC υφίσταται κατάκαυση είναι μόνο 110-250 °C. Σε κάθε περίπτωση, η μέθοδος έχει μάλλον μικρή πιθανότητα σωστού προσδιορισμού ενός τήγματος λόγω τόξου, της τάξεως του 27-60 %.



**Εικόνα 11** Παρουσίαση των ανθρακούχων προσμίξεων στην επιφάνεια ενός τήγματος (Έρευνα του Eui-Pueong Lee και των συνεργατών του)

## 2.3. Μέθοδοι AES,SIMS και ESCA

Υπάρχει ένας αριθμός τεχνικών που επιτρέπουν τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων ορισμένων στοιχείων που βρίσκονται σε ένα δείγμα μετάλλου. Αυτές περιλαμβάνουν την ηλεκτρονική φασματοσκοπία Auger(Auger Electron Spectroscopy-AES), την ηλεκτρονική φασματοσκοπία για χημική ανάλυση(Electron Spectroscopy for Chemical Analysis-ESCA) και την φασματοσκοπία μάζας δευτερογενών ιόντων(Secondary Ion Mass Spectrometry-SIMS). Με οποιαδήποτε από αυτές, μπορεί να εξαχθεί ένα προφίλ βάθους/συγκέντρωσης αφαιρώντας βαθμιαία τμήματα της επιφάνειας και εξετάζοντας το εσωτερικό στρώμα. Οι Erlandson και Strand χρησιμοποίησαν AES σε συνδυασμό με τα πειράματα που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, για να προσδιορίσουν την ποσότητα του χλωρίου που παρουσιάζεται στα σωματίδια που είναι προσαρτημένα στην επιφάνεια του τήγματος, αλλά, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η παρουσία του χλωρίου βρέθηκε να μην σχετίζεται αποκλειστικά με τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς και βρέθηκε να είναι εξίσου και στα τήγματα λόγω τόξου, εάν τα ηλεκτρικά τόξα δημιουργήθηκαν βραχυκυκλώνοντας μεταξύ τους μονωμένα, παρά γυμνά, καλώδια.

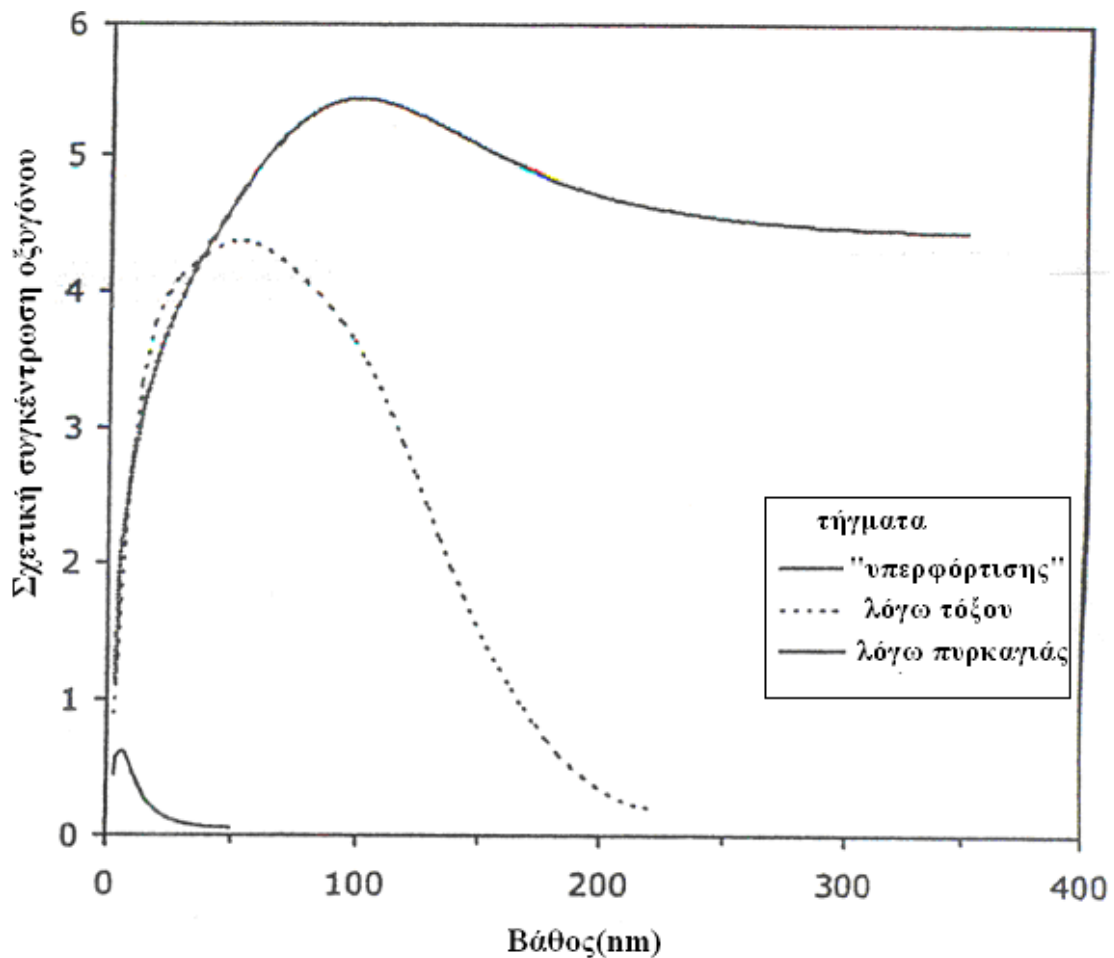
Το 1980,οι Maccleary και Thaman αποφάνθηκαν [21,22] ότι ένα τήγμα που σχηματίζεται χωρίς μια προϋπάρχουσα φωτιά (τήγμα λόγω τόξου) θα σχηματιζόταν σε μια οξειδωτική ατμόσφαιρα, ενώ ένα που θα εμφανιζόταν έπειτα από μία ήδη σε εξέλιξη φωτιά(τήγμα λόγω πυρκαγιάς) θα σχηματιζόταν σε μια αναγωγική ατμόσφαιρα. Συνεπώς, πίστευαν ότι το προφίλ της συγκέντρωσης οξυγόνου, σαν μία συνάρτηση του βάθους κάτω

από την επιφάνεια του τήγματος, θα καθιστούσαν δυνατή την ταυτοποίηση. Η ευρεσιτεχνία τους έδειξε ότι οι AES, ESCA ή SIMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό, αλλά για τις δικές τους μελέτες χρησιμοποιούσαν μόνο τη AES. Λόγω της περιορισμένης ευαισθησίας της τεχνικής που χρησιμοποιούσαν, για την ανάλυση πήραν την παράγωγο των στοιχείων του σήματος ως μεταβλητή και παρατήρησαν μονάχα τις σχετικές διαστάσεις και όχι μια απόλυτη βαθμονόμηση της συγκέντρωσης οξυγόνου. Η εικόνα 12 δείχνει 3 δείγματα που ανέλυσαν. Το τήγμα λόγω τόξου δημιουργήθηκε βραχυκυκλώνοντας 2 αγωγούς έχοντας τους προθερμάνει προηγουμένως για 15 δευτερόλεπτα. Το τήγμα λόγω πυρκαγιάς δημιουργήθηκε από μία μικρή φωτιά η οποία βραχυκύκλωσε ένα καλώδιο NM. Το τήγμα "υπερφόρτισης" δημιουργήθηκε παράγοντας μία υπερφόρτιση χαμηλής τάσης η οποία θέρμανε το καλώδιο για κάποιο χρονικό διάστημα (απροσδιόριστο) πριν ο αγωγός λιώσει και σχηματίσει τόξο. Οι συγγραφείς παρουσίασαν επίσης αποτελέσματα από 4 τήγματα που συλλέχθηκαν από πραγματικές φωτιές, όπου η αιτία που προκάλεσε τη φωτιά ήταν γνωστή. Το προτεινόμενο σχέδιό τους για την ταυτοποίηση των τηγμάτων ήταν να μην ασχοληθούν με τα πρώτα 5 nm της επιφάνειας (εφόσον αυτά πιθανότατα θα απεικόνιζαν την περιβαλλοντική οξείδωση του χαλκού) και να αξιολογήσουν το υπόλοιπο μέρος :

- εάν η συγκέντρωση είναι γενικά χαμηλή, το μέγιστο βρέθηκε στα 20nm ή λιγότερο μέσα στην επιφάνεια και οι συγκεντρώσεις πέρα από το μέγιστο γίνονται πολύ μικρές, τότε πρόκειται για τήγμα λόγω πυρκαγιάς

- εάν η συγκέντρωση είναι γενικά υψηλή, το μέγιστο βρίσκεται σε βάθος 20-200 nm και η συγκέντρωση φθίνει αργά σε μεγαλύτερα βάθη, τότε πρόκειται για τήγμα λόγω τόξου
- εάν η συγκέντρωση είναι πολύ υψηλή, και το οξυγόνο εντοπίζεται στα 2000-4000nm, τότε πρόκειται για τήγμα λόγω τόξου όπου προηγήθηκε τόξο εξαιτίας της παρατεταμένης υπερθέρμανσης.

Οι συγγραφείς επισήμαναν επίσης ότι η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν σημειωθεί τήξη ξανά. Για να εντοπίσουν το τελευταίο, πρότειναν να κοπεί ένα τήγμα στη μέση και να γίνει μία ανίχνευση με AES κατά μήκος της διαμέτρου. Εάν βρεθούν 4, αντί για 2, μέγιστα κατά μήκος της διαμέτρου, τότε έχει παρουσιαστεί επανάτηξη. Ο Robertsson και οι συνεργάτες του [23] προσπάθησαν να επικυρώσουν τη μέθοδο των MacCleary/Thaman, αλλά βρήκαν ότι τα γραφήματα οξυγόνου δεν ήταν αρκετά αξιόπιστα ώστε να διακρίνουν τα τήγματα λόγω τόξου από τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς.

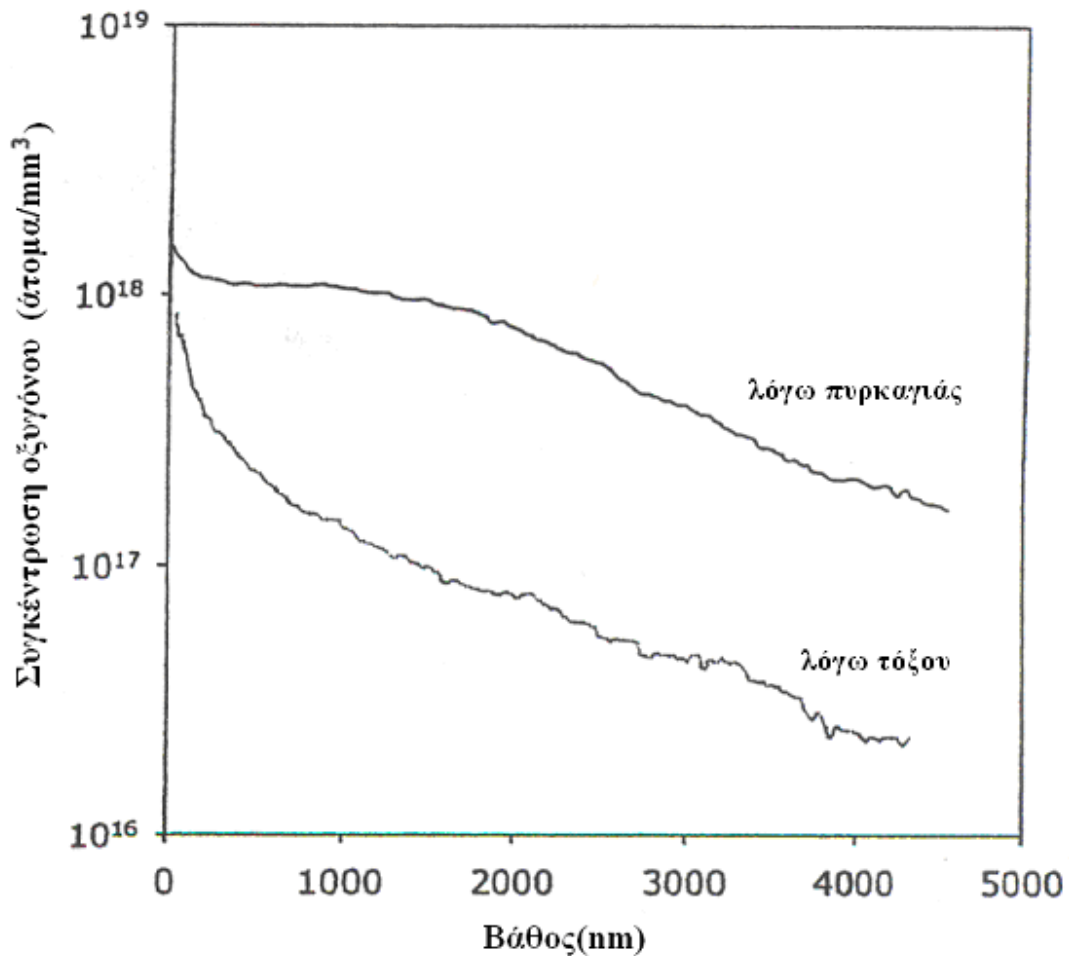


**Εικόνα 12** Διάγραμμα της συγκέντρωσης οξυγόνου όπως παρουσιάστηκαν στην εργασία των MacCleary και Thaman

Ο Satoh και οι συνεργάτες του[24] χρησιμοποίησαν τις μεθόδους AES και SIMS για να λάβουν προφίλ O,C και Cl σε τέσσερα αντιπροσωπευτικά δείγματα: ένα τήγμα λόγω τόξου και ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς από πραγματική φωτιά, και ένα τήγμα λόγω τόξου και ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς που παρήχθησαν στο εργαστήριο. Το τήγμα λόγω τόξου δημιουργήθηκε βραχυκυκλώνοντας ένα νήμα συνεστραμμένων αγωγών, και έπειτα εκθέτοντάς το σε ένα καυστήρα

φλόγας, ενώ το τήγμα λόγω πυρκαγιάς δημιουργήθηκε με την τοποθέτηση του νήματος μέσα σε ένα καυστήρα φλόγας έως ότου αυτό βραχυκυκλωθεί. Τα γραφήματα βάθους λήφθηκαν χαράζοντας την επιφάνεια με μία δέσμη ιόντων καισίου(για την μέθοδο SIMS) ή μια δέσμη ιόντων αργού(για την μέθοδο AES). Απεικόνισαν τα δεδομένα από τις 2 μεθόδους (AES και SIMS) με τρόπο ώστε να κανονικοποιήσουν τα εναπομείναντα στοιχεία στο Cu, ο οποίος επιλέχθηκε έτσι ώστε να έχει σταθερό γράφημα βάθους. Από τις προκαταρκτικές αυτές μελέτες, συμπεράναν ότι το πρωταρχικό γνώρισμα ενός τήγματος λόγω τόξου είναι ένα διάγραμμα οξυγόνου που ανεβαίνει μέχρι μια κορυφή περίπου στα 1000nm κάτω από την επιφάνεια, και μόνο τότε αρχίζει να κατεβαίνει. Αντίθετα, τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς παρουσίασαν συγκεντρώσεις O,C και Cl με όλες να έχουν παρόμοιας μορφής φθίνουσες καμπύλες, χωρίς κάποιο σημαντικό μέρος να ανεβαίνει. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μεθόδων AES και SIMS, συμπεράναν ότι η AES είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητη και αναποτελεσματική στην ικανότητα διάκρισης σε βάθος μεγαλύτερο από περίπου 1000nm και κατά συνέπεια συμπεράναν ότι η SIMS είναι προτιμότερη τεχνική. Σε μια πιο πρόσφατη μελέτη[25], χρησιμοποίησαν μόνο τη SIMS για να εξετάσουν 10 τήγματα που ανακτήθηκαν από φωτιές όπου η ταυτότητα (λόγω τόξου/λόγω πυρκαγιάς ) των τηγμάτων ήταν γνωστή(εικόνα 13). Ωστόσο οι φωτιές ήταν όλες μικρής έκτασης και καμία δεν είχε φτάσει στο στάδιο ολοκληρωτικής εξάπλωσης στο χώρο. Ένα από τα τήγματα είχε τόσο μεγάλη επιφανειακή ζημιά που θεωρήθηκε ακατάλληλο για ανάλυση. Από τα υπόλοιπα 9 τήγματα, όλα ταξινομήθηκαν σωστά χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κανόνα:

- εάν η (απόλυτη) συγκέντρωση οξυγόνου σε βάθος 3000nm είναι  $<10^{17}$  άτομα/mm<sup>3</sup>, τότε πρόκειται για τήγμα λόγω τόξου
- εάν η συγκέντρωση είναι  $>10^{17}$  άτομα/mm<sup>3</sup>, πρόκειται για τήγμα λόγω πυρκαγιάς



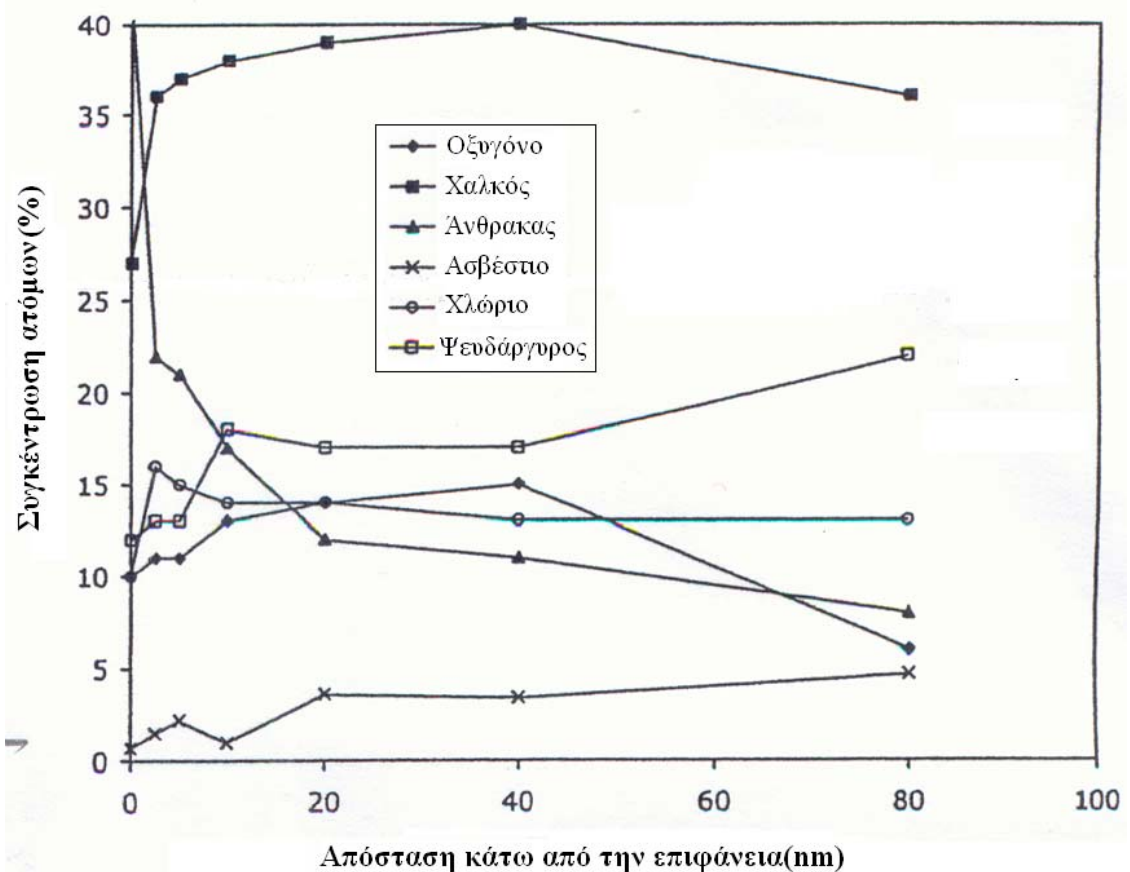
**Εικόνα 13** Γραφικές παραστάσεις της συγκέντρωσης του οξυγόνου, με βάση τις μετρήσεις του Satoh και των συνεργατών του

Προειδοποίησαν, εντούτοις, ότι τα αποτελέσματα πρέπει να θεωρηθούν προπαρασκευαστικά. Υπέθεσαν ότι η διάκριση προκύπτει

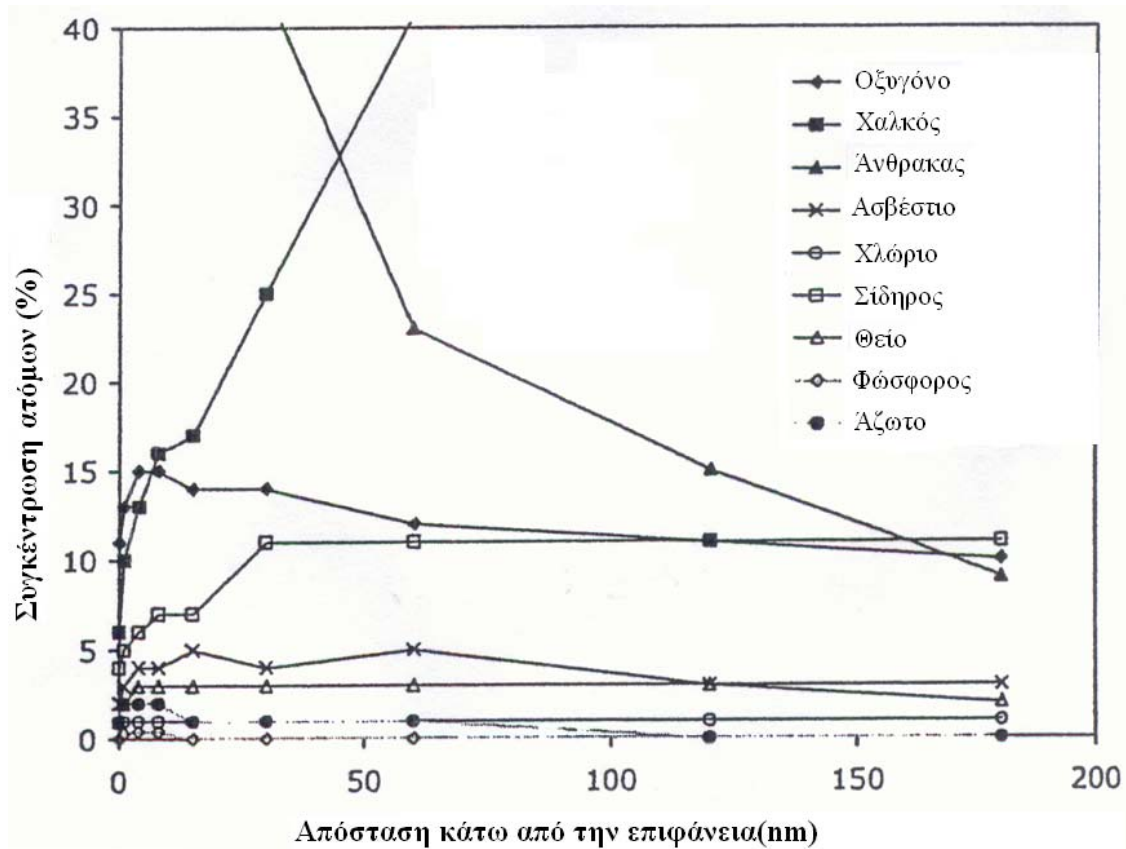
διότι όταν δημιουργείται ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλή και αυτό επιτρέπει ένα μεγαλύτερο ποσό οξυγόνου να διαχυθεί μέσα σε ένα κομμάτι χαλκού που έχει προθερμανθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό αποτελεί το ακριβώς αντίθετο της ταξινόμησης των Maccleary/Thaman, όπου χαμηλή-όχι υψηλή-συγκέντρωση οξυγόνου υποδηλώνει ένα τήγμα λόγω τόξου, αν και ο Satoh και οι συνεργάτες του ανέλυσαν συγκεντρώσεις σε πολύ μεγαλύτερα βάθη μέσα στο τήγμα, ενώ η τεχνική των Maccleary/Thaman είχε ικανοποιητική ευαισθησία για να χαρακτηρίσει μόνο μία λιγότερο βαθιά περιοχή. Ο Satoh και οι συνεργάτες του[26] συνέχισαν την έρευνα με 65 επιπλέον δείγματα από πραγματικές φωτιές και βρήκαν ότι υπήρχε συμφωνία μόνο κατά 39% μεταξύ της προτεινόμενης τεχνικής τους και του συμπεράσματος από τη συγκεκριμένη αυτή μελέτη φωτιάς.

Οι Maccleary και Thaman δεν επιδίωξαν να συνεχίσουν περαιτέρω τις ιδέες της ευρεσιτεχνίας τους, αλλά από το 1989 ο Anderson[27] έχει προωθήσει μία μέθοδο η οποία είναι μία επέκταση της ιδέας των Maccleary/Thaman. Ο Anderson παρατήρησε ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει μόνο σημαντικά ποσά οξυγόνου και αζώτου. Εάν εμφανιστεί ηλεκτρικό τόξο μεταξύ 2 καλωδίων σε ατμοσφαιρικό αέρα, τότε μόνο το οξυγόνο μπορεί να διαλυθεί μέσα στο τήγμα ενώ αυτό βρίσκεται σε κατάσταση τήξης(το άζωτο δεν διαλύεται μέσα στο χαλκό). Εντούτοις, αν εμφανιστεί τόξο σε ατμόσφαιρα όπου διαδραματίζεται φωτιά, τότε ένας αριθμός άλλων ατόμων θα βρεθούν στην ατμόσφαιρα τα οποία επίσης θα διαλυθούν μέσα στο τήγμα. Εκτός από του οξυγόνου, ο Anderson χρησιμοποίησε γραφήματα ατόμων

άνθρακα, χλωρίου, θείου, ασβεστίου, ψευδαργύρου, σιδήρου, φωσφόρου και χρωμίου. Δεν πρότεινε κάποια ποιοτικά κριτήρια για τη διάκριση μεταξύ τημάτων λόγω τόξου και λόγω πυρκαγιάς, στηριζόμενος αντί αυτού σε μια υποκειμενική αξιολόγηση, δίνοντας έμφαση στο προφίλ του άνθρακα. Έτσι, μια αρκετά μεγάλη συγκέντρωση άνθρακα θα υποδείκνυε ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς, ενώ μια έλλειψη αυτής θα αντιστοιχούσε σε ένα τήγμα λόγω τόξου. Η εικόνα 14 δείχνει ένα τήγμα που παρουσιάστηκε από τον Anderson [34] ως τήγμα λόγω τόξου, ενώ η εικόνα 15 δείχνει ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς.



**Εικόνα 14** Ένα τήγμα λόγω τόξου, 1<sup>η</sup> περίπτωση του Anderson.



**Εικόνα 15** Ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς, 3<sup>η</sup> περίπτωση του Anderson

Η βασική αντίληψη, ωστόσο, ότι οποιαδήποτε άτομα εκτός από άτομα οξυγόνου θα είναι διαθέσιμα για ενσωμάτωση μέσα σε τήγματα λόγω πυρκαγιάς, στερείται τεκμηρίωσης. Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, τα καλώδια μονώνονται με ένα πολυμερές υλικό, τυπικά με PVC. Το πολυμερές είναι σε επαφή με τον αγωγό και μπορεί να ατμοποιηθεί ανεξάρτητα με το αν το τήγμα τόξου ήταν το αίτιο της φωτιάς, ή αν δημιουργήθηκε πολύ αργότερα κατά τη διάρκεια της φωτιάς. Κατά συνέπεια, δεν είναι ξεκάθαρο γιατί μία παρουσία περισσότερων ατόμων άνθρακα ή χλωρίου θα συνιστούσε ένα τήγμα

λόγω πυρκαγιάς. Ομοίως, το ανθρακικό ασβέστιο είναι ένα κοινό υλικό πλήρωσης για πλαστικά που χρησιμοποιούνται στα καλώδια, οπότε το ασβέστιο μπορεί επίσης να εμφανιστεί είτε από την καταστροφή της μόνωσης του αγωγού ως συνέπεια του αρχικού σχηματισμού του ηλεκτρικού τόξου, ή από συμβάντα πολύ μεταγενέστερα κατά τη διάρκεια της φωτιάς.

Μία από τις βασικές εικασίες της θεωρίας των Maccleary/Thaman/Anderson είναι ότι τα στοιχειώδη προφίλ μέσα στο τήγμα είναι αμετάβλητα αφότου αυτό έχει ψυχθεί. Συνεπώς, θεωρείται ότι μόλις σταματήσει το ηλεκτρικό τόξο, η περαιτέρω έκθεση σε περιβάλλον φωτιάς δεν θα επηρεάσει την κατανομή των στοιχείων που θα βρεθούν μέσα στο τήγμα(εκτός πιθανότατα από τα πολύ επιφανειακά, τα οποία θα αφαιρεθούν και θα απορριφθούν κατά τη διαδικασία εξέτασής τους). Η αρχή είναι ότι η διαλυτότητα των αερίων είναι πολύ μεγαλύτερη στον υγρό χαλκό από ότι στο στερεό χαλκό. Συνεπώς, τα αέρια θα παγιδευτούν αφότου το τήγμα στερεοποιηθεί και αυτή η κατανομή θα παγιωθεί στο χώρο και θα είναι διαθέσιμη για μετέπειτα μελέτη. Ο Howitt [28] αντιπαρατάχθηκε σε αυτό, αλλά η βασική αντίληψη ότι μία ουσιαστικής σημασίας ποσότητα οξυγόνου μπορεί να διαλυθεί σε λειωμένο χαλκό είναι ορθή [29,30]. Μερικά αέρια μπορούν να εισχωρήσουν στο χαλκό ενώ είναι ζεστός αλλά εντούτοις όχι τετηγμένος. Αυτός είναι ο λόγος που τα πλεγμένα χάλκινα καλώδια που ανακτήθηκαν από φωτιές συνήθως θρυμματίζονται σε μικρά κομμάτια κατά τη διαδικασία της εξέτασής τους -το υλικό έχει μετατραπεί σε οξείδιο χαλκού και πλέον δεν έχει μηχανική αντοχή. Ο Howitt διεξήγαγε επίσης δοκιμές [31], χρησιμοποιώντας όμως φασματομετρία ακτίνων X

με διασπορά ενέργειας(Energy-Dispersive X-ray Spectrometry-EDS) αντί για AES. Κατακρίθηκε από ένα εργαστήριο που χρησιμοποιούσε τη μέθοδο AES [32] για χρήση τεχνικής που είχε πολύ μικρότερη ευαισθησία, αλλά αυτό δεν φαίνεται να ευσταθεί, εφόσον τα αποτελέσματά του παρουσίαζαν ικανοποιητική ευαισθησία. Μεγαλύτερο πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι δεν είχε στοιχειοθετηθεί ένα προφίλ βάθους, παρά μόνο η συγκέντρωση μέσα σε ένα σχετικά παχύ υπόστρωμα της επιφάνειας. Ο Howitt ανέλυσε 13 δείγματα που συγκεντρώθηκαν κάτω από διάφορες συνθήκες καύσης και μη-καύσης και διαπίστωσε ότι δεν μπορούσαν να βρεθούν συστηματικές διαφορές μεταξύ των συγκεντρώσεων C ή O οι οποίες θα αποδίδονταν στην ύπαρξη μίας φωτιάς που προυπήρχε του ηλεκτρικού τόξου.

Η χρήση της μεθόδου του Anderson από τους πραγματογνώμονες θα απαιτούσε ένα ποσοτικό πρωτόκολλο για την ανάλυση, ειδικότερα όσον αφορά στο πώς θα ληφθεί υπόψη το προφίλ βάθους. Η επιμετάλλωση ιονισμένου αργού χρησιμοποιείται στη μέθοδο του Anderson για να αφαιρέσει το εξωτερικό στρώμα(’’περιβαλλοντολογικό περίβλημα’’ στη δική του ορολογία). Στην αναφορά του, το περίβλημα περιλαμβάνει όλα τα στρώματα μέχρι την περιοχή που περιέχει τουλάχιστον 60% χαλκό. Συνεπώς το αμελητέο περιβαλλοντολογικό περίβλημα φέρεται να έχει μεγάλης διακύμανσης πάχη στις αναφορές του: 2,5 nm[36], ή 5nm [33], 5-10 nm [34], ή 5-20 nm [35]. Αλλά μόλις αφαιρεθεί το ’’περιβαλλοντολογικό περίβλημα’’, ο Anderson στηρίζεται αποκλειστικά σε μια ποιοτική θεώρηση ότι ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς παρουσιάζει ένα προφίλ όπου άτομα C, Cl και Ca είναι άφθονα σε μία μεγαλύτερη απόσταση κάτω από την επιφάνεια από ότι στα τήγματα

λόγω τόξου [36]. Δεν φαίνεται όμως να είναι σε θέση να καθορίσει κάποια ποιοτικά κριτήρια για να προβεί σε αυτήν τη διάκριση.

Ο Beland [37] επισήμανε ότι παρουσιάζεται ένα σημαντικό στατιστικό πρόβλημα με τη μέθοδο ακόμα και σε ένα απλό εργαστήριο: δοκιμές που διεξήχθησαν σε διαφορετικά σημεία του ίδιου τήγματος ουσιαστικά έδωσαν διαφορετικά αποτελέσματα. Ένας φασματογράφος AES μπορεί να λειτουργεί σε μία λειτουργία σάρωσης ράστερ για να χαρακτηρίσει τις περιοχές της επιφάνειας: εντούτοις, δεν έχει καταδειχθεί κάποια στατιστική τεχνική για τη λήψη χαρακτηριστικών μέσω των όρων με τον τρόπο αυτό. Επιπλέον επισήμανε [38] ότι η δημοσιευμένη δουλειά του Anderson δεν συμπεριλάμβανε καν στοιχειώδεις περιγραφές των δοκιμών που έγιναν, όπως για παράδειγμα τους χρόνους έκθεσης των δειγμάτων. Ο Anderson ισχυρίστηκε [35] ότι, σε περίπτωση αντιδικίας σε φωτιές, μπορούσε να διακρίνει σωστά τα τήγματα λόγω τόξου από τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς, αλλά ο Beland διαφώνησε λέγοντας ότι αυτό δε γίνεται "τυφλά".

Ο Ettlting [39] εξέτασε τα στοιχεία του Anderson[27] και βρήκε πολλά προβλήματα και ασυνέπειες. Σύμφωνα με την άποψή του, το βασικό πρόβλημα είναι ότι στις πραγματικές φωτιές-εν αντιθέσει με τις δοκιμές που διέτελεσε ο Anderson στο εργαστήριο-ένα τήγμα είναι πολύ πιθανό να παραμείνει στο περιβάλλον της φωτιάς για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, ανεξάρτητα με το αν πρόκειται για τήγμα λόγω τόξου ή για τήγμα λόγω πυρκαγιάς. Κατά συνέπεια, οι εργαστηριακές μελέτες όπου ένα τήγμα σχηματίστηκε και μετά απομακρύνθηκε γρήγορα από ένα περιβάλλον φωτιάς δεν παρουσιάζουν σχετικές πληροφορίες. Ο

Etlling επίσης επισήμανε ότι στη μελέτη του Anderson, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο ενός τήγματος που σχηματίστηκε στον αέρα ήταν υψηλότερη από ότι σε ένα τήγμα που σχηματίστηκε σε οξυγόνο. Ο Anderson στην εργασία του δεν έχει δώσει κάποια εξήγηση για αυτό(επίσης ο Anderson δεν έδωσε στην εργασία του οποιαδήποτε περιγραφή της προετοιμασίας των δειγμάτων ή των διαδικασιών έκθεσής τους). Άλλο ένα αμφισβητήσιμο αποτέλεσμα ήταν ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς που σχηματιζόταν δίπλα σε σοβατεπί, το οποίο τήγμα εμφάνισε μεγάλες ποσότητες θείου. Τα τόξα στην καλωδίωση ενός διακλαδιζόμενου κυκλώματος δεν ατμοποιούν υπό φυσιολογικές συνθήκες το σοβατεπί, και υπάρχει αμελητέα ποσότητα θεικού ασβεστίου που απελευθερώνεται ακόμα και όταν χάνεται το νερό ενυδάτωσης κατά τη διάρκεια του, μετά την υπερπήδηση της φωτιάς, σταδίου της. Κατά συνέπεια, ο Etlling συμπέρανε ότι η παρουσία θείου είναι πιθανότερο να προκαλέσει αλλοίωση σε ένα ζεστό τήγμα, παρά να γίνει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διαλεύκανση της αιτίας της φωτιάς.

Ο Etlling ανέλυσε επίσης την πιο πρόσφατη δημοσίευση του Anderson [34] όπου παρουσίασε αποτελέσματα της μεθόδου AES για τήγματα που ανακτήθηκαν από 3 φωτιές. Σε μία περίπτωση(εικόνα 10), το βαθύτερο στρώμα που εξετάστηκε ήταν 80 nm, και παρουσίασε μεγάλη ποσότητα ψευδαργύρου ίση με 2/3 της ποσότητας του χαλκού. Ο Etlling επισήμανε ότι, σε υψηλές θερμοκρασίες, ο ψευδάργυρος οξειδώνεται στον αέρα τόσο εύκολα που μόνο οξείδια ψευδαργύρου έπρεπε να υπάρχουν στον αέρα, και τα τελευταία είναι απίθανο να μεταναστεύσουν μέσα στο τήγμα. Για το λόγο αυτό, συμπέρανε ότι η μεγάλη αυτή ποσότητα ψευδαργύρου προερχόταν από έντονη ρύπανση

της επιφάνειας του τήγματος. Σε μία άλλη από τις περιπτώσεις παραδειγμάτων του Anderson (εικόνα 11), εξετάστηκε ένα τήγμα από καλώδιο ρεύματος προερχόμενο από μία ελαττωματική ηλεκτρική κατσαρόλα. Για τα στρώματα κάτω από το περιβαλλοντολογικό περίβλημα, ο χαλκός ήταν το αφθονότερο στοιχείο, με επόμενο το σίδηρο. Ο Anderson ισχυρίστηκε ότι ο σίδηρος προήλθε από το ελαττωματικό στοιχείο, αλλά αυτό θα είχε σαν προϋπόθεση ότι τόσο το τήγμα όσο και το στοιχείο θα σχημάτιζαν τόξο συγχρόνως, και ότι ένα μεγάλο μέρος του σιδήρου θα κατέληγε στο άλλο τήγμα. Εξίσου προβληματικό είναι το γεγονός ότι αν ο σίδηρος προερχόταν από το στοιχείο θέρμανσης, δεν θα είχε βρεθεί χρώμιο ή νικέλιο (από την ίδια την αντίσταση του καλωδίου).

Ο Henderson και οι συνεργάτες του [40] επιχείρησαν μία άμεση επιβεβαίωση της θεωρίας του Anderson ετοιμάζοντας δείγματα κάτω από 2 συνθήκες. Τα τήγματα λόγω τόξου ετοιμάστηκαν βραχυκυκλώνοντας συνεστραμένα καλώδια χαλκού 18 κλώνων στον αέρα, ενώ τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς τοποθετώντας το μονωμένο, ρευματοδοτούμενο καλώδιο σε μια φωτιά και περιμένοντας μέχρις ότου να σχηματιστεί ηλεκτρικό τόξο. Βρήκαν ότι τα προφίλ άνθρακα επικαλύπτονταν, και ότι δεν υπήρχε τρόπος να διαφοροποιήσουν αδιαμφισβήτητα τα 2 σύνολα των αποτελεσμάτων. Ο Beland διεξήγαγε ένα παρόμοιο σύνολο πειραμάτων [37] και απέσπασε το ίδιο συμπέρασμα συγκρίνοντας τα προφίλ χλωρίου στα τήγματα λόγω τόξου και τήγματα λόγω πυρκαγιάς.

Ο Reese [41] επισήμανε ότι στις κατοικίες, όταν μία φωτιά προέρχεται από καλωδίωση ενός κυκλώματος διακλάδωσης και εντοπιστεί ένα τήγμα, το συμβάν συνήθως προϋποθέτει σχηματισμό τόξου μέσω απανθράκωσης και όχι ένα απλό βραχυκύκλωμα μεταξύ μετάλλων. Το τελευταίο πιθανώς θα προκαλούσε ταχεία απόζευξη του αυτόματου διακόπτη του κυκλώματος και σπάνια θα προκαλούσε μία φωτιά. Έτσι, ενώ τήγματα καλωδίου μπορούν να παραχθούν εύκολα στο εργαστήριο απλά βραχυκυκλώνοντας μεταξύ τους 2 γυμνούς αγωγούς, αυτού του είδους το γεγονός δεν συμβαίνει συχνά σε φωτιές λόγω ατυχήματος. Εάν μία φωτιά προέρχεται από ένα ηλεκτρικό σφάλμα όπου πρώτα σημειώθηκε η απανθράκωση, ακολουθούμενη από βραχυκύκλωμα, τότε το αποτέλεσμα της δοκιμής AES θα είναι πιθανότατα ψευδώς αρνητικό, εφόσον θα σχηματιστεί σε ένα περιβάλλον που περιέχει προϊόντα αντίδρασης από την απανθράκωση της μόνωσης του καλωδίου. Ο Fitz [42] εκδήλωσε μία περισσότερο καίρια λογική ανησυχία για τη μέθοδο AES. Εκτός από το σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου μέσω απανθράκωσης, βραχυκύκλωμα μπορεί να συμβεί εξαιτίας της ροής της ακτινοβολούμενης θερμότητας που εκπίπτει σε ένα θερμοπλαστικό καλώδιο ή νήμα από μία σε εξέλιξη φωτιά. Όταν η μόνωση μαλακώσει ικανοποιητικά ώστε οι αγωγοί να έρθουν σε επαφή και να προκληθεί βραχυκύκλωμα, δεν θα υπάρξει οποιαδήποτε καύση ή προϊόντα καύσης στην περιοχή κοντά στο τόξο. Συγκεκριμένα αυτή η επίδραση μπορεί να εμφανιστεί μέσα σε συσκευές, στους κλωβούς μιας μηχανής, ή σε εσωτερικές κοιλότητες των τοίχων που υποβάλλονται σε εξωτερική θέρμανση. Συνεπώς, θα αναφερθεί ότι το αποτέλεσμα της μεθόδου AES είναι θετικό(δηλαδή το

τήγμα αυτό είναι η αιτία της φωτιάς) παρά το γεγονός ότι το τήγμα ήταν λόγω πυρκαγιάς και όχι λόγω τόξου.

Αν και πρόκειται για μια εργαστηριακή τεχνική που προσφέρεται για την επιστήμη της πραγματογνωμοσύνης, υπάρχει επίσης σοβαρή ανησυχία στο γεγονός ότι οι βασικές λεπτομέρειες του φαινομένου που χρησιμοποιούνται δεν έχουν μελετηθεί επιστημονικά. Τα στοιχεία που ταυτοποιήθηκαν σε ένα φάσμα AES πρέπει αρχικά να ξεκινάνε σαν άτομα ή μόρια κάπου αλλού. Μέσω των διαδικασιών μεταφοράς και αντίδρασης, κατέληξαν να ενσωματωθούν στο τήγμα, αλλά το χημικό ιστορικό που τα μετέφερε εκεί δεν έχει καν εικαστεί. Επιπλέον, μετά την είσοδό τους στο τήγμα, δεν υπάρχει κάποια θεωρία που να παρέχει ποσοτική κατανόηση των προφίλ βάθους και των διάφορων παραλλαγών της πλευρικής συγκέντρωσης τους στο τήγμα.

Μόνο μία δημοσίευση βρέθηκε να υποστηρίζει τους ισχυρισμούς του Anderson. Οι Metson και Hobbis [43] διεξήγαγαν μία ανάλυση AES σε ένα απλό τήγμα που συλλέχθηκε από την κοιλότητα ενός τοίχου σε χώρο όπου διαδραματιζόταν φωτιά, αλλά πρότειναν ότι αρκεί αναφορά στη μελέτη του Anderson για να επικυρώσει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Ο Anderson παρουσίασε τη μέθοδό του ως ιδανική για την επιστήμη της πραγματογνωμοσύνης, αλλά σε τουλάχιστον μία περίπτωση [44] η μέθοδος απορρίφθηκε από το δικαστήριο, με την απόφαση να είναι ότι "αποτυγχάνει να ανταπεξέλθει στις δοκιμές που θεσπίστηκαν στο Cromate και είναι κάπως αναξιόπιστη, διότι δεν έχει συσταθεί πρωτόκολλο για τη δοκιμή, ότι δεν είχε γίνει ελεγχόμενη

δοκιμή που να επιβεβαιώσει την αξιοπιστία της ανάλυσης, και ότι οι δοκιμές δεν είναι αναγνωρισμένες στο χώρο.’’

### 3. Σχόλια

Οι περισσότερες προτεινόμενες μέθοδοι ήταν καθαρά εμπειρικές, χωρίς κάποια θεωρητική βάση. Προφανώς, μπορούσαν να επικυρωθούν μόνο με την επικράτηση των εμπειρικών δεδομένων. Αλλά κάποιες άλλες αναφέρονται σε μία θεωρητική παραδοχή, αν και δεν έχει προταθεί μια ρεαλιστική ποσοτική θεωρία από κάποιον ερευνητή. Οι σχετικές αρχές στηρίζονται αναγκαία στην υπόθεση ότι τα χημικά ή θερμικά ιστορικά των τηγμάτων λόγω τόξου και λόγω πυρκαγιάς σχηματίζουν μη επικαλυπτόμενους πληθυσμούς. Αναφορικά με τα χημικά ιστορικά, υπάρχουν μόνο 2 υποθέσεις : (1) Τα τήγματα λόγω τόξου και λόγω πυρκαγιάς είναι μοναδικά συσχετισμένα με οξειδωτικές και αναγωγικές ατμόσφαιρες, αντίστοιχα. Με τη σειρά της, η περιεκτικότητα του τήγματος σε οξυγόνο θα το απεικονίζει μοναδικά. Αλλά όπως παρατήρησαν ο Robertsson και οι συνεργάτες του [23] : ’’Η περιεκτικότητα σε οξυγόνο στο επιφανειακό στρώμα ενός τετηγμένου τήγματος δεν εξαρτάται μόνο από το είδος της ζημιάς, αλλά επίσης και από το θερμικό προ και μετά ιστορικό της ηλεκτρικής βλάβης’’. Με άλλα λόγια, μόλις σχηματιστεί ένα τήγμα-είτε πρόκειται για τήγμα λόγω τόξου ή για τήγμα λόγω πυρκαγιάς-μπορεί να παραμείνει για μεγάλο χρονικό διάστημα σε ατμόσφαιρες, που μεταβάλλονται από οξειδωτικές(καλή παροχή οξυγόνου), μέχρι αναγωγικές (εξάντληση της ποσότητας οξυγόνου, πυρακτωμένα ή απανθρακωμένα ερείπια κτιρίου).

(2) Η ατμόσφαιρα που περιβάλλει ένα τήγμα λόγω πυρκαγιάς θα περιέχει υλικό που προέρχεται από γειτονικά στερεά που αποσυντίθενται, ενώ αυτό δεν συμβαίνει σε ένα τήγμα λόγω τόξου. Επαρκής ποσότητα του υλικού αυτού (άνθρακας κλπ) θα βρεθεί τότε στο τήγμα. Ωστόσο αυτή η υπόθεση αντικρούεται, όταν θεωρείται ότι τόξα μπορούν και εμφανίζονται σε περιβάλλοντα όπου η μόνωση έχει ουσιαστικά υποβαθμιστεί. Αντιστρόφως, ένα βραχυκύκλωμα που οφείλεται σε τετηγμένη μόνωση καλωδίου μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια φωτιάς σε ένα προστατευμένο περιβάλλον όπου δεν υπάρχουν προϊόντα τοπικής καύσης και ένα ελάχιστο μόνο των προϊόντων πυρόλυσης.

Τα θερμικά ιστορικά στα τήγματα λόγω τόξου μπορεί να ποικίλουν, αλλά είναι δύσκολο να διατυπωθεί οποιαδήποτε άποψη που να διαχωρίζει άμεσα τα τήγματα λόγω τόξου από τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία του ίδιου του τόξου είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία στις φλόγες, αλλά αυτό δεν βοηθάει να γίνει διάκριση, αφού τόσο η θερμοκρασία του τόξου όσο και η θερμοκρασία της φλόγας έχουν προσεγγισθεί κάποια στιγμή και από τα 2 είδη τήγματος. Κάθε τήγμα αναμένεται να παραμείνει σε μία φωτιά για μεγάλο ή μικρό χρονικό διάστημα μετά το σχηματισμό του. Μια μεγάλη χρονική περίοδος πολύ υψηλών θερμοκρασιών στους αγωγούς, εξαιτίας υπερφόρτισης, μπορεί επίσης να προηγηθεί του σχηματισμού ενός ηλεκτρικού τόξου. Η επανάτηξη ενός τήγματος τόξου, φυσικά, είναι ευρέως αποδεκτό ότι εξαλείφει οποιαδήποτε πιθανότητα να συμπεράνουμε το προηγούμενο ιστορικό του. Μία ερευνητική ομάδα πρότεινε ότι τα τήγματα λόγω τόξου, μόλις σχηματιστούν, είναι πιθανό

να στερεοποιηθούν σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό προϋποθέτει ότι η θέρμανση λόγω φωτιάς δεν θα είναι απότομη, όταν ένα τήγμα λόγω τόξου προκαλέσει μία φωτιά. Η υπόθεση αυτή είναι αμφισβητήσιμη και, σε κάθε περίπτωση, δεν έχει εξεταστεί πειραματικά εκτός την μελέτη των συγγραφέων.

Οι περισσότερες τεχνικές που περιγράφονται στη βιβλιογραφία έχουν χαρακτηριστεί από τους συγγραφείς τους ως διερευνητικές, σε αρχικό στάδιο μελέτες, και όχι ως οριστικές, επικυρωμένες μέθοδοι. Η μόνη εξαίρεση είναι η μέθοδος του Anderson, η οποία όπως ισχυρίζεται ο ίδιος είναι αρκετά ανεπτυγμένη, ώστε να είναι κατάλληλη για την επιστήμη της πραγματογνωμοσύνης. Αλλά τα στοιχεία δεν υποστηρίζουν την άποψη του ότι η μέθοδος αυτή είναι πράγματι έτοιμη για τέτοια χρήση. Τα βασικά προβλήματα με τη μέθοδο είναι : (1) εκτός από το ότι γνωρίζουμε ότι το οξυγόνο και κάποια άλλα στοιχεία μπορούν να διαλυθούν μέσα σε λειωμένο χαλκό, δεν υπάρχει κάποια χημική ή μεταλλουργική μελέτη που να εξετάζει τις λεπτομέρειες της διαδικασίας και να θεμελιώνει μία θεωρητική βάση για τις κατανομές των συγκεντρώσεων που αναμένονται στο στερεοποιημένο τήγμα. (2) δεν έχουν αναπτυχθεί ποσοτικά κριτήρια για τη διάκριση μεταξύ των 2 τύπων τηγμάτων (3) ακόμα και αν δεν εμφανίζεται ρύπανση μετά τη φωτιά, η επαναλαμβανόμενη θέρμανση στο χώρο της φωτιάς καθιστούν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων αβέβαιη (4) η μέθοδος πραγματικά υποβάλλεται στην παραγωγή ψευδών θετικών ή ψευδών αρνητικών αποτελεσμάτων. Τα ψευδώς θετικά θα ήταν πράγματι πρόβλημα, κρίνοντας από την αναφορά του Anderson [45] ότι καθόρισε το 1/3 των

τηγμάτων τόξου που εξέτασε να είναι τήγματα λόγω τόξου. Σε κανονικά γεγονότα, τα τήγματα λόγω πυρκαγιάς έπρεπε να υπερισχύουν αριθμητικά των τηγμάτων λόγω τόξου με μεγάλη διαφορά, δεδομένου ότι πολλές φωτιές προκαλούν μεγάλης έκτασης σχηματισμούς τόξων, ενώ γενικά υπάρχει μόνο ένα -το πολύ- τόξο υπεύθυνο για την έναυση της φωτιάς.

#### 4. Συμπεράσματα

Μετά από μία αναλυτική εξέταση των δημοσιεύσεων, ο συντάκτης δε βρίσκει πολλά υποσχόμενη καμία από τις μεθόδους που έχουν προταθεί για τη διάκριση μεταξύ τηγμάτων λόγω τόξου και τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς. Οι λόγοι είναι οι ακόλουθοι :

- (1) Πολλές μέθοδοι έχουν παρουσιαστεί χωρίς να στηρίζονται σε κάποια θεωρία. Αλλά οι λίγες θεωρίες που έχουν παρουσιαστεί εμφανίζουν ασυμφωνία με την ποικιλία των περιπτώσεων που γνωρίζουμε ότι συναντώνται σε πυρκαγιές κτιρίων.
- (2) Εκτός ελαχίστων περιπτώσεων, όλες οι μέθοδοι έχουν χαρακτηριστεί ως ποιοτικές και υποκειμενικές, χωρίς αναφορές στην ποσοτικοποίηση.
- (3) Οι μέθοδοι τυπικά βασίστηκαν σε μελέτες με χρήση εξαιρετικά μικρού αριθμού πειραμάτων. Στις λίγες μελέτες όπου χρησιμοποιήθηκαν ικανοποιητικά δείγματα ώστε να μπορέσουν να εξαχθούν στατιστικά συμπεράσματα, οι πληθυσμοί των τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς και λόγω τόξου παρουσίασαν σημαντική επικάλυψη,

έτσι ώστε να μπορούσαν να εξαχθούν μόνο τάσεις , και όχι κατηγοριοποιήσεις. Στη μοναδική μελέτη όπου η σύγκριση έγινε σε ένα αρκετά μεγάλο αριθμό τηγμάτων από πραγματική φωτιά με γνωστή την ταυτότητά τους, τα αποτελέσματα ήταν μη αποδεκτά(39% επιτυχία)

- (4) Σχεδόν όλες οι εκθέσεις σε φωτιά των τηγμάτων που δημιουργήθηκαν στο εργαστήριο ήταν πολύ διαφορετικές από τις πραγματικές πυρκαγιές κτιρίων.
- (5) Καμία από τις μεθόδους δεν έχει επικυρωθεί ανεξάρτητα, αν και έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες επικύρωσης και όλες κατέληξαν σε συμπεράσματα μη αναπαραγωγής.
- (6) Οι περισσότεροι ερευνητές που πρότειναν τις διάφορες μεθόδους τις παρουσίασαν ότι είναι στο πνεύμα των ιδεών που αξίζουν την περαιτέρω έρευνα, αλλά ο Anderson υποστήριξε ότι η μέθοδος του είναι τόσο τεκμηριωμένη που έπρεπε ήδη να είχε γίνει αποδεκτή για την επιστήμη της πραγματογνωμοσύνης. Εντούτοις, η μέθοδος του δεν φαίνεται να είναι περισσότερο υποσχόμενη από τις άλλες μεθόδους.

Επιπλέον, υπάρχει σοβαρή αμφιβολία για το αν οποιαδήποτε μέθοδος που θα μπορούσε να αναπτυχθεί στο μέλλον ότι θα ευσταθεί και ότι θα είναι αξιόπιστη. Αυτό είναι πιθανό μόνο αν οι χημικές ή θερμικές συνθήκες έκθεσης ήταν αμετάβλητα διαφορετικές κατά το σχηματισμό των τηγμάτων λόγω τόξου έναντι των τηγμάτων λόγω πυρκαγιάς. Αλλά διακρίσεις τέτοιου είδους δεν έχουν ανακαλυφθεί.

## Μέρος 2<sup>ο</sup>

### Η δημιουργία τηγμάτων αλουμινίου και η θερμοκρασία τους κατά την πρόσκρουση στο έδαφος

Το 2<sup>ο</sup> μέρος βασίζεται στο βιβλίο: Π.Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ, Κ.Γ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ, ΑΘΗΝΑ 2003

Κατά το χρονικό διάστημα που διαρκεί το βραχυκύκλωμα δεν αναπτύσσονται θερμοκρασίες, που να δικαιολογούν τη δημιουργία τηγμάτων από τους αγωγούς. Επισημαίνεται, ότι η δημιουργία τηγμάτων από τους αγωγούς δεν έχει καμία σχέση με την εκδήλωση σπινθηρισμών, γιατί τα τήγματα σχετίζονται με υπερθέρμανση των αγωγών (όταν δεν επενεργήσει η προτεταγμένη της θέσης βραχυκύκλωσης προστασία, που όμως είναι σχεδόν απίθανο να συμβεί αυτό) ενώ οι σπινθηρισμοί με τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης, λόγω π.χ. σκόνης επί των μονωτήρων. Αν θεωρηθεί ότι δημιουργήθηκαν τήγματα από ένα γυμνό αγωγό εξ αλουμινίου (π.χ. μίας γραμμής μέσης ή χαμηλής τάσης, τότε για τη θερμοδυναμική κατάσταση ενός τήγματος ισχύει η σχέση:

$$m \cdot c \cdot (d\Delta\theta/dt) + K \cdot A \cdot \Delta\theta = 0 \quad (1)$$

όπου  $m$  η μάζα του τήγματος,  $\Delta\theta$  η διαφορά θερμοκρασίας,  $c=0,22$  kcal/(kg $^{\circ}$ C),  $A$  η επιφάνεια του τήγματος,  $K$  ένας συντελεστής που αφορά την απαγωγή θερμότητας και  $t$  ο χρόνος.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$\int_{\Delta\theta_1}^{\Delta\theta_2} d\Delta\theta / \Delta\theta = - \int_0^t (KA / mc) dt$$

Για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος π.χ.  $\theta_a=40$  °C (υψηλός καύσωνας) και θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου 660 °C είναι:

$$\Delta\theta_1 = 660-40=620$$
 °C

και:

$$\ln \Delta\theta_2 = \ln 620 - (t \cdot K \cdot A) / mc$$

ή:

$$\Delta\theta_2 = \exp \{ 6,43 - (t \cdot K \cdot A) / mc \}$$

Με D τη διάμετρο του τήγματος και  $\gamma$  το ειδικό βάρος είναι:

$$\Delta\theta_2 = \exp \{ 6,43 - (6 t \cdot K) / (D \cdot \gamma \cdot c) \} \quad (2)$$

Για τον συντελεστή K ισχύει κατά Holmes η σχέση:

$$K = 7 + 400 \cdot v \quad \text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (3)$$

όπου v η ταχύτητα του τήγματος σε m/sec και t ο χρόνος πτήσης κατά τη θεωρία της ελεύθερης βολής:

$$t = (2H/g)^{0,5} \quad (4)$$

όπου H το ύψος πτώσης (π.χ.  $H = 9$  m) και  $g=9,81$  m/sec<sup>2</sup>.

Με  $D=0,005$  m (που είναι συνήθως η διάμετρος των τηγμάτων),  $\gamma=2700$  kg/m<sup>3</sup> και ανέμους π.χ. 6 μποφόρ ( $v=13,8$  m/s), από τις σχέσεις 2 και 3 υπολογίζονται αντίστοιχα οι τιμές K και  $\Delta\theta_2$ :

$$K = 7 + 400 \cdot 13,6 = 5447 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) = 5447 \cdot 0,000239 = 1,30 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C s})$$

και

$$\Delta\theta_2 = \exp \{6,43 - (6 \cdot 1,354 \cdot 1,30) / (5 \cdot 2,7 \cdot 0,22)\} = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Επομένως, υπό συνθήκες υψηλού καύσωνα ( $\theta_a = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) η θερμοκρασία  $\theta_2$  είναι περίπου:

$$\theta_2 = \theta_a + \Delta\theta_2 = 40 + 18 = 58 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

Συνεπώς, η θερμοκρασία των υποθετικών τηγμάτων κατά την πρόσκρουση τους στο έδαφος θα ήταν  $58 \text{ } ^\circ\text{C}$  περίπου, θερμοκρασία καλώς ανεκτή σε επαφή με το χέρι, που δεν είναι δυνατόν να προκαλέσει ανάφλεξη σε ξερά χόρτα, κλαδιά κ.λ.π. τα οποία αναφλέγονται σε κατά πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες.

## Σημείωση

Σημειώνεται ότι στα ίδια συμπεράσματα καταλήγει κανείς και μέσω της θεωρίας της ρευστομηχανικής, όπως φαίνεται στις επόμενες σελίδες. Πράγματι, σύμφωνα με μια δημοσιευμένη αναλυτική μέθοδο (κατά τη θεωρία της ρευστομηχανικής)[48], λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς, τόσο η οριακή ταχύτητα των σφαιριδίων αλουμινίου κατά την πτώση τους, όσο και η οριζόντια μετατόπιση τους λόγω του πνέοντος ανέμου. Αρχικά διερευνάται γενικά η τροχιά που διαγράφει ένα τήγμα, το οποίο πέφτει από ύψος  $H$ . Για την τροχιά του τήγατος στον κατακόρυφο και στον οριζόντιο άξονα ισχύουν οι σχέσεις:

$$u_x'[t] - \frac{z}{m} (u_a - u_x[t])^2 = 0 \quad (2-1)$$

$$u_y'[t] + \frac{z}{m} u_y^2[t] - g = 0 \quad (2-2)$$

όπου  $u_x[t]$  η ταχύτητα του τήγματος στο οριζόντιο άξονα την χρονική στιγμή  $t$ ,  $u_y[t]$  η ταχύτητα του τήγματος στον κατακόρυφο άξονα την χρονική στιγμή  $t$ ,  $u_a$  η ταχύτητα του πνέοντος ανέμου,  $m$  η μάζα του τήγματος,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $z$ , συντελεστής που εξαρτάται από την μετωπική επιφάνεια και το σχήμα του τήγματος. Το σχήμα του τήγματος θεωρήθηκε ότι είναι σφαιρικό.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις οριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} t &= 0 \\ u_x[0] &= 0 \\ u_y[0] &= 0 \end{aligned}$$

η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων δίνεται από τις σχέσεις:

$$u_y[t] = \sqrt{\frac{g \cdot m}{z}} \cdot \text{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g \cdot z}{m}} \cdot t\right] \quad (2-3)$$

$$u_x[t] = u_a \cdot \left(1 - \frac{m}{m + u_a \cdot z \cdot t}\right) \quad (2-4)$$

Η σχετική ταχύτητα ως προς την ταχύτητα του ανέμου  $u_a$ , στον οριζόντιο άξονα είναι:

$$u_{xs} = u_a - u_x \quad (2-5)$$

και η συνισταμένη ταχύτητα:

$$u = \sqrt{u_{xs}^2 + u_y^2} \quad (2-6)$$

από τις σχέσεις (2-3), (2-4), (2-5) και (2-6) προκύπτει:

$$\sqrt{\frac{g \cdot m}{z} \cdot (\text{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g \cdot z}{m}} \cdot t\right])^2 + u_a^2 \cdot \left(\frac{m}{m + u_a \cdot z \cdot t}\right)^2} \quad (2-7)$$

Ο χρόνος πτώσης στο έδαφος από ύψος  $H$  υπολογίζεται από τη σχέση (2-3) που δίνει την ταχύτητα στον κατακόρυφο άξονα ( $u_y$ ) δια

ολοκληρώσεως στον χρόνο πτώσης ( $t_{\pi}$ ). Η σχέση που προκύπτει είναι η ακόλουθη:

$$H = \frac{m}{z} \cdot \text{Log} \left[ \cosh \left[ t_{\pi} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot z}{m}} \right] \right] \quad (2-8)$$

Επομένως η χρονική διάρκεια της πτώσης ( $t_{\pi}$ ) είναι:

$$t_{\pi} = \sqrt{\frac{m}{g \cdot z}} \text{ArcCosh} \left[ \text{Exp} \left[ \frac{H \cdot z}{m} \right] \right] \quad (2-9)$$

και η απόσταση  $l$  που απομακρύνεται κατά την πτώση δίδετε από την σχέση:

$$l = U_a \cdot t + \frac{m}{z} \cdot \ln \left[ \frac{m}{m + U_a \cdot z \cdot t} \right]$$

Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του τήγματος  $\theta(t)$  κατά τη διάρκεια της πτώσης του, εξετάζεται το ισοζύγιο της θερμότητας στο τήγμα που περιγράφεται από την διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \frac{h \cdot A}{m \cdot c} \Delta\theta \quad (2-10)$$

όπου  $\Delta\theta$  η διαφορά θερμοκρασίας του τήγματος από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος  $\Delta\theta_{\pi}$  την χρονική στιγμή  $t$ ,  $c$  η ειδική θερμότης του υλικού του τήγματος,  $A$  η εξωτερική επιφάνεια του τήγματος και  $h$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με συνεπαγωγή.

Ο συντελεστής  $h$  υπολογίζεται από γνωστές σχέσεις που δίνονται στη βιβλιογραφία, οι οποίες καταλήγουν σε παραπλήσια αποτελέσματα. Παρακάτω θα χρησιμοποιηθεί ο υπολογισμός του  $h$  κατά R. Holm για την περίπτωση του αέρα, όπως έγινε και στην προηγούμενη μέθοδο

υπολογισμού. Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του  $h$  δίνεται σε συνάρτηση του αριθμού Nussel (Nu), ως ακολούθως:

$$h = \text{Nu} \cdot \frac{k}{l}$$

όπου  $k$  η αγωγιμότητα του ρευστού (Fluid conductivity) και  $L$  το χαρακτηριστικό μήκος (Characteristic Dimension). Ο αριθμός Nussel ορίζεται με διαφορετικό τρόπο για κάθε σχήμα αντικειμένου και συνήθως δίνεται ως γινόμενο των δυνάμεων των αριθμών Reynolds (Re) και Prandtl (Pr). Στην προκειμένη περίπτωση ισχύει:

$$\text{Nu} = 0,37 \cdot (\text{Re})^{0,6}$$

Ο αριθμός Reynolds (Re) ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Re} = u \cdot \frac{L}{\nu} = \rho \cdot u \cdot \frac{L}{\mu}$$

όπου  $u$  η ταχύτητα του ρευστού σε μεγάλη απόσταση από το σώμα,  $\rho$  η πυκνότητα και  $\mu$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν μόνο στην περίπτωση του αέρα. Για άλλα ρευστά ισχύουν διαφορετικές σχέσεις.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω η διαφορική εξίσωση (2-10) διαμορφώνεται ως εξής με τον συντελεστή  $h$  κατά R.Holm:

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{\Delta\theta(t)} = \frac{\{7 + 400 \cdot u(t)\} \cdot A}{m \cdot c} dt \quad (2-11)$$

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης (2-11), λαμβάνοντας υπ' όψιν την σχέση (2-9) που δίνει τη χρονική διάρκεια της πτώσης ( $t_\tau$ ) και την οριακή συνθήκη

$$t=0, \Delta\theta = \Delta\theta_\tau$$

όπου  $\Delta\theta_\tau$  είναι η διαφορά της αρχικής θερμοκρασίας του τήγματος από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος  $\theta_\pi$  είναι:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_\tau \cdot \text{Exp}\left(\frac{400 \cdot A}{m \cdot c} \int_0^{\sqrt{\frac{m}{g \cdot z}} \cdot \text{ArcCosh}\left[\text{Exp}\left[\frac{H \cdot z}{m}\right]\right]} \{u(t)\} dt\right) \quad (2-12)$$

και

$$\theta = \Delta\theta_\tau \cdot \text{Exp}\left(\frac{400 \cdot A}{m \cdot c} \int_0^{\sqrt{\frac{m}{g \cdot z}} \cdot \text{ArcCosh}\left[\text{Exp}\left[\frac{H \cdot z}{m}\right]\right]} \{u(t)\} dt\right) + \theta_\pi \quad (2-13)$$

Η σχέση (2-13) δίνει τη θερμοκρασία του τήγματος σαν συνάρτηση του ύψους (H) από το οποίο γίνεται η ελεύθερη πτώση του.

Στη συνέχεια εξετάζεται η εφαρμογή του μοντέλου για την προκειμένη περίπτωση, δηλαδή για τήγματα αλουμινίου που πέφτουν από ύψος 9m υπό ένταση ανέμου 6 μποφόρ.

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (2-3), (2-4), (2-5), (2-7) και (2-8) προκύπτει ο πίνακας που ακολουθεί και αφορά τις ταχύτητες  $u_y[t]$ ,  $u_x[t]$ ,  $u_{xs}[t]$ , την συνισταμένη ταχύτητα  $u[t]$  και το ύψος H. Οι υπολογισμοί έγιναν μέσω κατάλληλου λογισμικού.

Όπως προκύπτει από τη σχέση (2-9), και τον πίνακα 2, για ύψος H=9m, ο χρόνος πτώσης ισούται με 1,5 s.

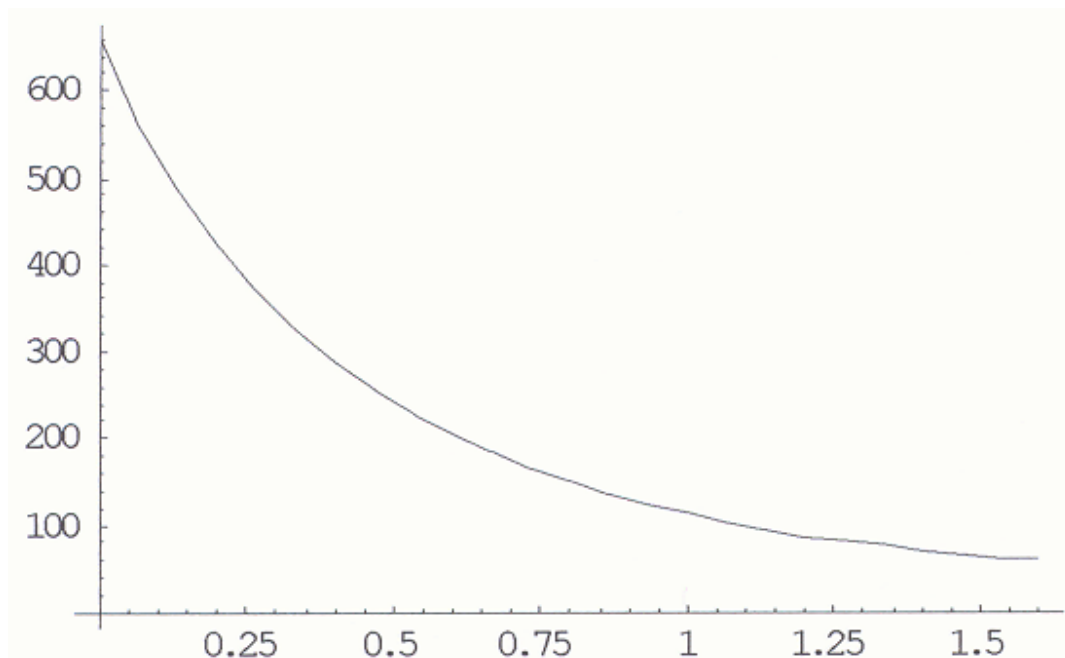
Το διάγραμμα της εικόνας 16 που ακολουθεί δίνει παραστατικά την θερμοκρασία  $\theta$  ενός τήγματος αρχικής θερμοκρασίας 630 °C καθ' όλη τη διάρκεια της πτώσης του από ύψος 9m όταν πνέει άνεμος με ταχύτητα 6 Beaufort.

Ο αναλυτικός υπολογισμός της θερμοκρασίας  $\theta_2$  από τη σχέση (2-13) ενός τήγματος αρχικής θερμοκρασίας 620 °C κατά τη διάρκεια της πτώσης

του από ύψος 9 m όταν πνέει άνεμος με ταχύτητα 6 Beaufort δίνει την τιμή των 64 °C.

Οι υπολογισμοί λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζουν έγιναν μέσω κατάλληλου λογισμικού. Εκτυπώσεις από τα φύλλα υπολογισμού δίδονται στις επόμενες σελίδες.

Συνεπώς, εκ των δύο μεθόδων υπολογισμού προκύπτει για τη θερμοκρασία  $\theta_2$ , ως μία μέση προσέγγιση, η τιμή:  $\theta_2 = 58 + 64 / 2 = 61$  °C.



**Εικόνα 16** Η θερμοκρασία  $\theta$  ενός τήγματος αρχικής θερμοκρασίας 630 °C. Κατά την διάρκεια της πτώσης του από ύψος 9 m όταν πνέει άνεμος με ταχύτητα 6 Beaufort. Η κλίμακα του οριζόντιου άξονα είναι σε δευτερόλεπτα.

## Υπολογισμοί

<b>t</b>	<b><math>u_y</math></b>	<b><math>u_x</math></b>	<b><math>u_{xs}</math></b>	<b>u</b>	<b>H</b>
0	0	0	13.6	13.6	0
0.05	0.490227	0.60154	12.99846	13.0077	0.012259
0.1	0.978823	1.15212	12.44788	12.4863	0.048996
0.15	1.464176	1.657954	11.94205	12.03147	0.110087
0.2	1.944719	2.124283	11.47572	11.63933	0.195333
0.25	2.418948	2.555561	11.04444	11.30624	0.304454
0.3	2.885438	2.955596	10.6444	11.02856	0.437099
0.35	3.342862	3.327666	10.27233	10.80257	0.592847
0.4	3.790002	3.674603	9.925397	10.62439	0.771213
0.45	4.225762	3.99887	9.60113	10.48994	0.971657
0.5	4.649174	4.302621	9.297379	10.395	1.193584
0.55	5.059406	4.587741	9.012259	10.3353	1.436355
0.6	5.455759	4.855894	8.744106	10.30654	1.699293
0.65	5.837672	5.10855	8.49145	10.30452	1.98169
0.7	6.204715	5.347016	8.252984	10.32522	2.282812
0.75	6.556588	5.572455	8.027545	10.36486	2.601909
0.8	6.893112	5.785904	7.814096	10.41994	2.938215
0.85	7.214218	5.988296	7.611704	10.48728	3.290963
0.9	7.519946	6.180469	7.419531	10.56404	3.659381
0.95	7.810425	6.363177	7.236823	10.64774	4.042703
1	8.085873	6.537103	7.062897	10.73619	4.440173
1.05	8.346576	6.702865	6.897135	10.82755	4.851045
1.1	8.592888	6.861025	6.738975	10.92023	5.27459
1.15	8.825212	7.012094	6.587906	11.01294	5.7101
1.2	9.043997	7.156538	6.443462	11.1046	6.156886
1.25	9.249725	7.294784	6.305216	11.19434	6.614282
1.3	9.442905	7.427223	6.172777	11.28147	7.081649
1.35	9.624062	7.554212	6.045788	11.36548	7.558372
1.4	9.793737	7.676082	5.923918	11.44596	8.043864
1.45	9.952474	7.793135	5.806865	11.52265	8.537564
1.5	10.10082	7.905652	5.694348	11.59535	9.038938

**Πίνακας 2.** Οι ταχύτητες  $u_y[t]$ ,  $u_x[t]$ ,  $u_{xs}[t]$ ,  $u[t]$  και το ύψος  $H$  σε σχέση με τον χρόνο πτώσης  $t$ .

$$r = 0.025$$

$$0.025$$

$$c = 915$$

$$915$$

$$\varepsilon = 2700$$

$$2700$$

$$S = 3.14 * r^2$$

$$0.000019625$$

$$V = \frac{4}{3} * 3.14 * r^3$$

$$6.54167 \times 10^{-8}$$

$$A = 4 * 3.14 * r^2$$

$$0.0000785$$

$$m = \varepsilon * V$$

$$0.000176625$$

$$g = 9.81$$

$$9.81$$

$$z = 0.0625 * S * 9.8$$

$$0.0000120203$$

$$U_a = 13.6$$

13.6

k = 400

400

$$U_y := \sqrt{\frac{g * m}{z}} * \text{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g * z}{m}} * t\right]$$

$$U_x := U_a * \left(1 - \frac{m}{m + U_a * z * t}\right)$$

$$U_{xs} := U_a - U_x$$

$$U := \sqrt{U_y^2 + U_{xs}^2}$$

Table[Evaluate[U<sub>y</sub>, {t, 0, 3, 0.05}]]

{0, 0.490227, 0.978823, 1.46418, 1.94472, 2.41895, 2.88544, 3.34286, 3.79, 4.22576, 4.64917, 5.05941, 5.45576, 5.83767, 6.20472, 6.55659, 6.89311, 7.21422, 7.51995, 7.81043, 8.08587, 8.34658, 8.59289, 8.82521, 9.044, 9.24973, 9.4429, 9.62406, 9.79374, 9.95247, 10.1008, 10.2393, 10.3685, 10.4888, 10.6009, 10.7052, 10.8022, 10.8922, 10.9759, 11.0535, 11.1255, 11.1923, 11.2541, 11.3114, 11.3645, 11.4136, 11.459, 11.501, 11.5399, 11.5758, 11.609, 11.6397, 11.668, 11.6942, 11.7184, 11.7407, 11.7613, 11.7804, 11.7979, 11.8141, 11.8291}

Table[Evaluate[U<sub>x</sub>, {t, 0, 3, 0.05}]]

{0, 0.60154, 1.15212, 1.65795, 2.12428, 2.55556, 2.9556, 3.32767, 3.6746, 3.99887, 4.30262, 4.58774, 4.85589, 5.10855, 5.34702, 5.57245, 5.7859, 5.9883, 6.18047, 6.36318, 6.5371, 6.70287, 6.86103, 7.01209, 7.15654, 7.29478, 7.42722, 7.55421, 7.67608, 7.79314, 7.90565, 8.01389, 8.11809,

8.21848, 8.31525, 8.40861, 8.49872, 8.58576, 8.66988, 8.75123, 8.82993,  
 8.90612, 8.97991, 9.05142, 9.12075, 9.188, 9.25325, 9.31661, 9.37815,  
 9.43794, 9.49606, 9.55258, 9.60757, 9.66108, 9.71318, 9.76391, 9.81334,  
 9.86151, 9.90847, 9.95427, 9.99894}

Table[Evaluate[U<sub>xs</sub>, {t, 0, 3, 0.05}]]

{13.6, 12.9985, 12.4479, 11.942, 11.4757, 11.0444, 10.6444, 10.2723,  
 9.9254, 9.60113, 9.29738, 9.01226, 8.74411, 8.49145, 8.25298, 8.02755,  
 7.8141, 7.6117, 7.41953, 7.23682, 7.0629, 6.89713, 6.73897, 6.58791,  
 6.44346, 6.30522, 6.17278, 6.04579, 5.92392, 5.80686, 5.69435, 5.58611,  
 5.48191, 5.38152, 5.28475, 5.19139, 5.10128, 5.01424, 4.93012, 4.84877,  
 4.77007, 4.69388, 4.62009, 4.54858, 4.47925, 4.412, 4.34675, 4.28339,  
 4.22185, 4.16206, 4.10394, 4.04742, 3.99243, 3.93892, 3.88682, 3.83609,  
 3.78666, 3.73849, 3.69153, 3.64573, 3.60106}

Table[Evaluate[U, {t, 0, 3, 0.05}]]

{13.6, 13.0077, 12.4863, 12.0315, 11.6393, 11.3062, 11.0286, 10.8026,  
 10.6244, 10.4899, 10.395, 10.3353, 10.3065, 10.3045, 10.3252, 10.3649,  
 10.4199, 10.4873, 10.564, 10.6477, 10.7362, 10.8275, 10.9202, 11.0129,  
 11.1046, 11.1943, 11.2815, 11.3655, 11.446, 11.5226, 11.5953, 11.664,  
 11.7285, 11.7888, 11.8452, 11.8976, 11.9461, 11.991, 12.0323, 12.0702,  
 12.105, 12.1367, 12.1655, 12.1917, 12.2153, 12.2366, 12.2557, 12.2728,  
 12.2879, 12.3013, 12.3131, 12.3233, 12.3322, 12.3398, 12.3462, 12.3515,  
 12.3559, 12.3593, 12.362, 12.3639, 12.3651}

$$h := \frac{m}{z} \cdot \text{Log}[\text{Cosh}[t \cdot \sqrt{\frac{g \cdot z}{m}}]]$$

Table[Evaluate[h, {t, 0, 3, 0.05}]]

{0, 0.0122591, 0.0489955, 0.110087, 0.195333, 0.304454, 0.437099,  
0.592847, 0.771213, 0.971657, 1.19358, 1.43635, 1.69929, 1.98169,  
2.28281, 2.60191, 2.93822, 3.29096, 3.65938, 4.0427, 4.44017, 4.85104,  
5.27459, 5.7101, 6.15689, 6.61428, 7.08165, 7.55837, 8.04386, 8.53756,  
9.03894, 9.54748, 10.0627, 10.5842, 11.1115, 11.6441, 12.1819, 12.7242,  
13.271, 13.8217, 14.3762, 14.9342, 15.4954, 16.0595, 16.6264, 17.1959,  
17.7677, 18.3418, 18.9178, 19.4957, 20.0753, 20.6565, 21.2393, 21.8233,  
22.4086, 22.9951, 23.5827, 24.1712, 24.7607, 25.351, 25.9421}

$$l := U_{at} + \frac{m}{z} * \text{Log}\left[\frac{m}{m + t \cdot U_{az}}\right]$$

Table[Evaluate[l, {t, 0, 3, 0.05}]]

{0, 0.0152653, 0.0593053, 0.129732, 0.224443, 0.341577, 0.479478,  
0.63667, 0.811826, 1.00375, 1.21137, 1.4337, 1.66986, 1.91904, 2.18048,  
2.45352, 2.73753, 3.03193, 3.33619, 3.64982, 3.97236, 4.30339, 4.64252,  
4.98937, 5.34362, 5.70492, 6.073, 6.44756, 6.82833, 7.21508, 7.60757,  
8.00558, 8.40889, 8.81732, 9.23068, 9.64879, 10.0715, 10.4986, 10.93,  
11.3656, 11.8051, 12.2485, 12.6957, 13.1465, 13.6008, 14.0585, 14.5195,  
14.9838, 15.4512, 15.9216, 16.3949, 16.8712, 17.3502, 17.8319, 18.3163,  
18.8032, 19.2926, 19.7845, 20.2788, 20.7753, 21.2742}

h = 9

9

$$\theta_\alpha = 40$$

40

$$\Delta\theta_0 = 660 - \theta_\alpha$$

620

$$th = \sqrt{\frac{m}{g \cdot z}} \cdot \text{ArcCosh}\left[\text{Exp}\left[\frac{h \cdot z}{m}\right]\right]$$

1.49614

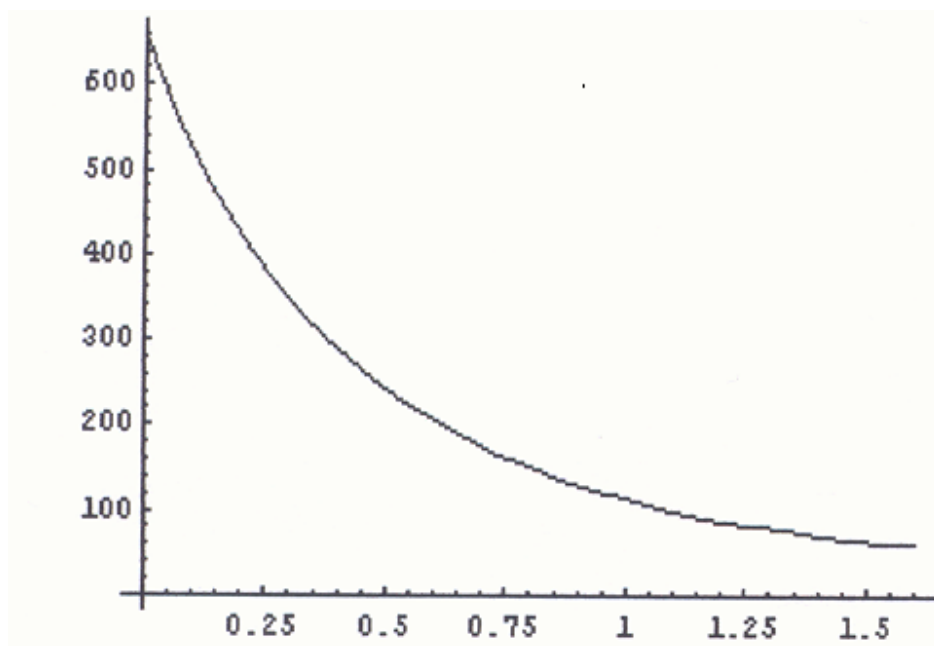
$$n := \text{NIntegrate}[U, \{t, 0, th\}]$$

$$\theta := \Delta\theta_0 \cdot \text{Exp}\left[-\frac{k \cdot A}{m \cdot c} \cdot n\right] + \theta_\alpha$$

Evaluate[ $\theta$ ]

64.974

Plot [Evaluate[ $\theta$ ], {h, 0, 1.6}]



## Βιβλιογραφία

- [1] Babrauskas, V., Ignition Handbook, to be published.
- [2] Takaki, A., On the effect of Thermal Histories upon the Metallographic Structure of Electric Wires, Reports of the National Research Institute of Police Science-Research on Forensic Science 24:2, 48-56 (June 1971).
- [3] Guide for Fire and Explosion Investigations (NFPA 921), Natl. Fire Protection Assn., Quincy MA (2001).
- [4] Shaw, C. E., Fire Marshals on Duty, NFPA J. 59, 26-27 (July 1965): 96-97 (Nov. 1965).
- [5] Levinson, D. W., Copper Metallurgy as a Diagnostic Tool for Analysis of the Origin of Building Fires, Fire Technology 13, 211-222 (1977).
- [6] Singh, R. P. Scanning Electron Microscopy of Burnt Electric Wires, Scanning Microscopy 1:4, 1539-1544 (1987).
- [7] Ettling, B. V., Electrical Wiring in Building Fires, Fire Technology 14, 317-325 (1978).
- [8] Seki, T., Hasegawa, H., Imada, S., and Isao, Y., Determination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires by DAS, National Institute of Testing and Evaluation, Kiryu, Gunma, Japan (2000).
- [9] Ishibashi, Y., and Kishida, J., Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires, pp. 83-90 in 1990 Annual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg. (1990).
- [10] Gray, D. A., Drysdale, D. D., and Lewis, F. A. S., Identification of Electrical Sources of Ignition in Fires, Fire Safety J. 6, 147-150 (1983).

- [11] Erlandsson, R., and Strand, G., An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage, *Fire Safety J.* 8, 97-103 (1984/85).
- [12] Tokyo Fire Department, Investigation Section, Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires, *J. Japan Assn. for Fire Science*
- [13] Mitsuhashi, N., Discrimination between Primary and Secondary Arc Marks on Electric Wires by Microvoid Distribution, *Reports of the National Research Institute of Police Science* 48:1, 20-26 (1995).
- [14] Oba, K., Identification of Melting Marks of Electric Wires (unpublished report), Yamagata Prefecture Police Headquarters, Criminal Scientific Laboratory, Japan (1980).
- [15] Miyoshi, S., Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads, presented at 15<sup>th</sup> Mtg. Intl. Assn. of Forensic Sciences, Los Angeles (1999).
- [16] Miyoshi, S., Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads, pp 653, 656 in *Proc. 4<sup>th</sup> Asia-Oceania Symp. on Fire Science & Technology*, Asia-Oceania Assn. for Fire Science and Technology/Japan Assn. for Fire Science & Engineering, Tokyo 2000).
- [17] Lee, E.-P., et al., Discrimination between Primary and Secondary on Electric Wires by DAS, *J. Applied Fire Science* 9, 361-379 (1999/2000).
- [18] Masui, M., Possibility of Carbon Inclusion in the Molten Mark of Polyvinyl Chloride Insulated Cords due to a Fire, *Trans. IEE Japan* 112A:1, 78-79 (1992).
- [19] Lee, E., Ohtani, H., Marsubara, Y., Seki, T., Hasegawa, H., and Imada, S., Study on Primary and Secondary Molten Marks, pp. 209-212 in *Proc. 1<sup>st</sup> Conf. Assn. Korean Japanese Safety Engineering Society*, Korean Institute for Industrial Safety (1999).

- [20] Lee, E.-P., Ohtani, H., Marsubara, Y., Seki, T., Hasegawa, H., Imada, S., and Yashiro, I., Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks Using Carbonized Residue, *Fire Safety J.* 37, 353-368 (2002).
- [21] Did the Short Cause the Fire or Did the Fire Cause the Short? *Fire & Arson Investigator* 30:1, 57-58 (Jul/Sep 1979).
- [22] MacCleary, R. C., and Thaman, R. N., Method for Use in Fire Investigation, US Patent 4,182,959 (1980).
- [23] Robertsson, A., Karlsson, S. E., Strand, G., and Nilsson, G., Smaltskador pa elektriska ledare [Melt Damages on Electric Wires] (Rapport 20), Centrum for Forensisk Vetenskap, Linkoping, Sweden (1988).
- [24] Satoh, K., Sugisaki, M., Kakizaki, S., Itoh, C., Saitoh, K., and Iwaki, M., Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) and Auger Electron Spectroscopy (AES) Applied to the Fire Investigation for Short Circuit, pp. 282-285 in Proc. 1996 Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg. (1996).
- [25] Satoh, K., Fukushima, H., Sigeru, S., and Iwaki, M., Verification SIMS Applied to the Fire Investigation for Short Circuit, pp. 336-336 in Proc. 1998 Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg. (1998).
- [26] Kitamura, Y., and Satoh, K., Progress of the Study on Electrical Beads (No. 2), *Japanese J. Science and Technology for Identification* 6, Suppl., 105 (Oct. 2001).
- [27] Anderson, R. N., Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation, *J. Forensic Sciences* 34, 633-637 (1989).
- [28] Howitt, D. G., The Surface Analysis of Copper Arc Beads-A Critical Review, *J Forensic Science* 42, 608-609 (1997).

- [29] Massalski, T. B., ed., Binary Alloy Phase Diagrams, 2<sup>nd</sup> ed., ASM International, Materials Park OH (1990).
- [30] Kattner, U. R., NIST, private communication (2001).
- [31] Howitt, D. G., The Chemical Composition of Copper Arc Beads-A Red Herring for the Fire Investigator, *Fire and Arson Investigator* 48:3, 34-39 (Mar, 1998).
- [32] Hirt, D., Letter to the Editor: At Best 'Junk Science' and at Worst Deliberately Misleading, *Fire and Arson Investigator* 48: 4, 5, 63 (July 1998).
- [33] Anderson, R. N., Brosz, H. G., Posey, E., and Schefelbein, B., Recent Advances in Auger Analysis of Electrical Arc Residues , pp. 162-166 in 13<sup>th</sup> Meeting, Intl. Assn. of Forensic Sciences (1993).
- [34] Anderson, R. N., Which Came First...The Arcing or the Fire? Review of Auger Analysis of Electrical Arc Residues, *Fire and Arson Investigator* 46:3, 38-40 (Mar. 1996).
- [35] Anderson, R. N., Letter to the Editor, *Fire and Arson Investigator* 45:2, 44-45 (Dec. 1994).
- [36] Anderson, R. N., Scientific Examination of Electrical Arc Residues to Determine Fire Cause, *Fire and Arson Investigator* 42:3, 58-59 (Mar. 1992).
- [37] Beland, B., Examination of Arc Beads, *Fire and Arson Investigator* 44:4, 20-22 (June 1994)
- [38] Beland, B., Further Comments on Arc Bead Examination, *The Fire Place* [Washington State IAAI Chapter newsletter], 24-28(Apr./May 1997).
- [39] Ettling, B. V., Problems with Surface Analysis of Copper Beads Applied to the Time of Arcing, *The Fire Place* [Washington State IAAI Chapter newsletter] 21-24 (Oct./Nov. 1997).

- [40] Henderson, R., Manning, C., and Barnhill, S., Questions Concerning the Use of Carbon Content to Identify "Cause" vs. "Result" Beads in Fire Investigations, *Fire and Arson Investigator* 48:3,26-27 (July 1998).
- [41] Reese, N. D., Letter to the Editor: Arc Beads, *Fire and Arson Investigator* 48:4, 63-64 (July 1998).
- [42] Fitz, M.M., MDE Engineers, private communication (2001).
- [43] Metson, J. B., and Hobbis, C. M., The Use of Auger Electron Spectroscopy in Fire Investigations, *Chemistry in New Zealand* 7-9 (July 1994).
- [44] VFW Posts & Commercial Union Insurance vs. Western States Construction, Inc., Case No. 95L15808, 12<sup>th</sup> Judicial Circuit, Will County, Illinois (30 July 1999).
- [45] Anderson, R. N., What Came First? The Arc Bead or the Fire? *EC&N* 100, 20-21 (July 2001).
- [46] Π.Δ.Μπούρκας, Κ.Γ.Καραγιαννόπουλος, Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά, Αθήνα (2003)
- [47] Babrauskas, V., Fires due to Electric Arcing : Can "Cause" Beads Be Distinguished from "Victim" Beads by Physical or Chemical Testing? pp. 189-201 in *Fire and Materials 2003*, Interscience Communications Ltd., London (2003)
- [48] Ψαρρός Ε., Κούρος Σ., Καραγιαννόπουλος Κ., Μπούρκας Π., Εκτίμηση της θερμοκρασίας συνδέσμων λόγω αύξησης της αντίστασης διάβασης ή υπερεντάσεων, Πρακτικά της Ελληνικής Επιτροπής Cigre, σελ. 245-252, Αθήνα 2005.
- [49] Holm R., *Electric Contacts Theory and Applications*, Springer Verlag, 4<sup>th</sup> Edition, Berlin, 1979.

[50] Galler D., Klem T. J., Arcing on Copper Wires in Residential Electrical Systems, Still under revision, January 25, 2005