



ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ  
Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ  
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ  
ΤΗΣ ΥΛΗΣ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : -Σβορώνος Αντώνιος Α.Μ : 38901**

**-Τζαγκαράκης Ιωάννης Α.Μ : 39527**

**Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Αδαμίδης Ελευθέριος**



**-ΑΘΗΝΑ 2016-**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u> .....	2
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></u>	
<u>ΟΡΙΣΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΧΡΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ</u> .....	3
1.1 Η Φύση της ραδιενέργειας .....	3
1.2 Είδη ραδιενέργειας .....	4
1.3 Μέτρηση της ραδιενέργειας .....	5
1.4 Χρήση και επικινδυνότητα της ραδιενέργειας .....	6
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ</u> <u>ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ΣΕ ΥΛΙΚΑ</u> .....	9
2.1 Εισαγωγή στους πυρηνικούς αντιδραστήρες .....	9
2.2 Επιπτώσεις ραδιενέργειας στα υλικά των πυρηνικών αντιδραστήρων.....	10
2.3 Τα βασικά της βλάβης από ακτινοβόληση.....	11
2.4 Μακροσκοπικές επιπτώσεις από τη ραδιενεργό βλάβη σε ακτινοβολημένα υλικά (Σκλήρυνση με ακτινοβόληση) .....	16
2.5 Ευθραυστότητα μέσω ακτινοβόλησης .....	19
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΑΛΛΑΓΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ (βλάβες και αναίρεση</u> <u>αυτών) ΑΠΟ ΤΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ</u> .....	20
3.1 Επιπτώσεις ακτινοβολίας στον εφελκυσμό.....	20
3.2 Σκλήρυνση από ακτινοβόληση με σχάση νετρονίων (Συμβατικά Cr-Mo και χάλυβες μειωμένης ενεργοποίησης).....	22
3.3 Ενδυναμωμένοι μέσω διασποράς οξειδίων χάλυβες.....	25
3.4 Σκλήρυνση μέσω ακτινοβόλησης με 14MeV νετρόνια .....	25
3.5 Σκλήρυνση μέσω ακτινοβόλησης-επιδράσεις από το Ήλιο.....	27
<u>ΕΠΙΛΟΓΟΣ</u> .....	31
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u> .....	33

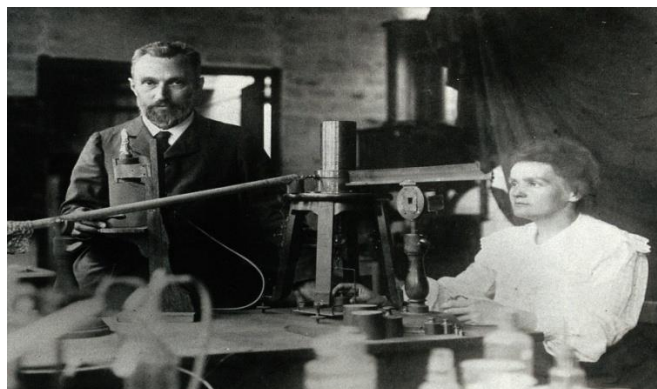
Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει θέμα τη ραδιενέργεια και τη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβδινων υλικών και των υλικών των πυρηνικών αντιδραστήρων έπειτα από έκθεση σε ακτινοβολία. Γίνεται αναφορά στη ραδιενέργεια γενικότερα, αλλά και πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο βελτίωσης ενός υλικού (σκλήρυνση) για καλύτερη απόδοση και διάρκεια (radiation improvement). Ωστόσο, κάτω από ορισμένες συνθήκες ακτινοβόλησης, η ραδιενέργεια μπορεί να προκαλέσει αντίθετα αποτελέσματα όπως ευθραυστότητα ενός υλικού ή υλικών του πυρηνικού αντιδραστήρα και των τοιχωμάτων του (radiation damage). Εκτενής αναφορά γίνεται επίσης στις βλάβες που μπορεί να προκαλέσει η ραδιενέργεια, στις αλλαγές των μηχανικών ιδιοτήτων σε μοριακό επίπεδο καθώς και στις επιπτώσεις της ακτινοβολίας σε εφελκυσμό και ευθραυστότητα.

Ο βασικός κορμός αυτής της έρευνας γίνεται σε αντιδραστήρες διαφόρων ειδών, όπου χρησιμοποιούνται ραδιενεργές δέσμες από νετρόνια σχάσεως και νετρόνια σύντηξης ενέργειας 14 MeV με τα οποία βομβαρδίζουμε καθαρό σίδηρο και χάλυβες (με διάφορες προσμίξεις μετάλλων σε πολύ μικρές αναλογίες όπως Cr, Mo, V, Ni αλλά και οξειδίων και ηλίου  $^4\text{He}$ ) σε διάφορες δόσεις ακτινοβόλησης, σε διάφορες πιέσεις και σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

#### 1.1 Η Φύση της ραδιενέργειας

Με τον όρο ραδιενέργεια προσδιορίζουμε το φαινόμενο της εκπομπής σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους πυρήνες ορισμένων χημικών στοιχείων που γι' αυτό το λόγο ονομάζονται ραδιενεργά. Τα άτομα των οποίων οι πυρήνες έχουν διαφορετικό αριθμό πρωτονίων ή/και νετρονίων ονομάζονται νουκλίδια. Από τα περίπου 2500 νουκλίδια που είναι γνωστά στην επιστήμη, λιγότερα από 300 είναι ραδιενεργά. Γενικά, η ραδιενέργεια είναι μία μορφή ενέργειας που προέρχεται από μία πηγή, μεταφέρεται στο χώρο και έχει τη δυνατότητα να διαπερνά ορισμένα υλικά. Η ραδιενέργεια ανακαλύφθηκε τυχαία το 1896 από το Γάλλο Μπεκερέλ, ο οποίος παρατήρησε ότι τα ορυκτά του ουρανίου εκπέμπουν ακτινοβολία χωρίς καμία εξωτερική επίδραση.

Οι πρώτες ανακοινώσεις του Μπεκερέλ διέγειραν το ενδιαφέρον ενός νεαρού ζεύγους φυσικών, του Πιέρ και της Μαρίας Κιουρί. Στις 18 Ιουλίου του 1898 οι Κιουρί αναγγέλουν στην ακαδημία των επιστημών την ανακάλυψη ενός στοιχείου, του Πολωνίου που ονομάστηκε έτσι προς τιμήν της πατρίδας της Μαρίας. Στις 25 Δεκεμβρίου του 1898 αναγγέλουν την ανακάλυψη του Ραδίου. Η Μαρία πρότεινε να ονομάσουν ραδιενέργεια την ιδιότητα εκπομπής ακτινοβολιών και ραδιενεργά τα σώματα που την έχουν. Με μαθηματικούς όρους συμβολίζουμε τη ραδιενέργεια με  $R$  και την χαρακτηρίζουμε ως τον αριθμό των διασπόμενων ραδιενεργών ατόμων στη μονάδα του χρόνου ( $R = dn / dt$ ), όπου  $dN$  ο αριθμός των πυρηνικών διασπάσεων που γίνονται σε μία ποσότητα ραδιενεργού ισοτόπου στη μονάδα του χρόνου  $dt$  με έκλιση ηλεκτρομαγνητικής ή σωματιδιακής ακτινοβολίας.



Πηγή: [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)

Ανάλογα με το είδος της πυρηνικής της μεταβολής, η ραδιενέργεια προέρχεται τόσο από φυσικές όσο και από τεχνητές πηγές :

**Φυσική ραδιενέργεια** : Προέρχεται από τη διάσπαση ραδιενεργών ορυκτών (φυσική διάσπαση πυρήνων), από τις συνεχείς μεταβολές που συμβαίνουν στον αστρικό χώρο (κοσμική ακτινοβολία) καθώς και από τον ίδιο τον άνθρωπο στου οποίου το σώμα εισέρχονται ραδιενεργά ισότοπα μέσω των τροφών και του αέρα που εισπνέει (εσωτερική ραδιενέργεια).



Πηγή: users.sch.gr 1

**Τεχνητή ραδιενέργεια** : Προέρχεται από τις συνεχείς προσπάθειες του ανθρώπου για την κατανόηση της φύσης και των νόμων της οδηγώντας τον στη μελέτη της δομής του πυρήνα και των δυνάμεων που συγκρατούν τα συστατικά του. Λόγω της τεράστιας ενέργειας που περικλείεται στον πυρήνα, ο άνθρωπος επινόησε τεχνητούς τρόπους απελευθέρωσής της, με τη βοήθεια των μηχανισμών της πυρηνικής σχάσης και σύντηξης. Στις ανθρωπογενείς αυτές δραστηριότητες περιλαμβάνονται ηλεκτρονικές συσκευές (φούρνοι μικροκυμάτων, τηλεοράσεις), ιατρικές πηγές (ακτίνες X, διαγνωστικές εξετάσεις) και δοκιμές πυρηνικών όπλων.

## 1.2 Είδη ραδιενέργειας

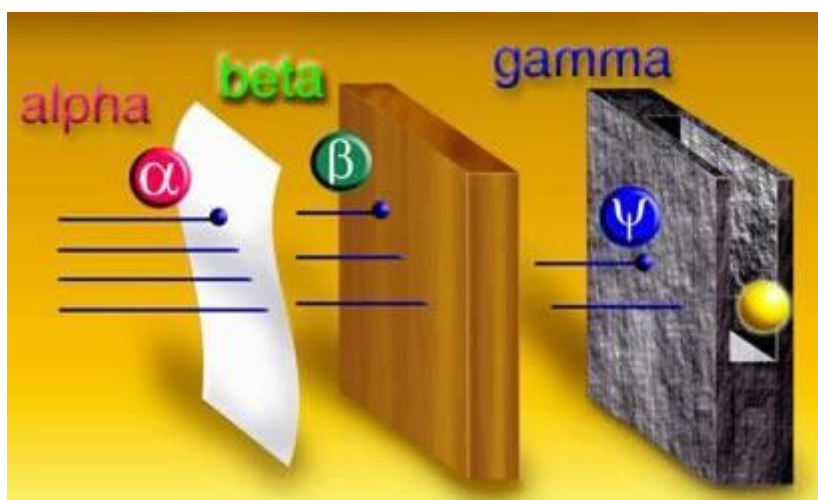
---

Η ραδιενέργεια, ανάλογα με τη διεισδυτικότητά της, διαχωρίζεται σε :

- σωματίδια  $\alpha$  (radiation alpha)
- σωματίδια  $\beta$  (radiation beta)
- ακτινοβολία  $\gamma$  και ακτίνες X (Gamma and X-rays radiation)

Τα σωματίδια  $\alpha$  (ράδιο, ουράνιο, ραδόνιο, θόριο) είναι θετικά φορτισμένα σωματίδια ύλης που αποτελούνται από 2 πρωτόνια και 2 νετρόνια, ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Μερικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων  $\alpha$  είναι η μικρή διεισδυτικότητά τους καθώς μπορούν να διεισδύσουν στους ιστούς σε βάθος μόλις 0,06 mm. Για

παράδειγμα δε μπορούν να διαπεράσουν το ανθρώπινο δέρμα αλλά μπορούν να απορροφηθούν από ένα φύλλο χαρτί. Ωστόσο μπορούν να αποδειχθούν επικινδύνα σε ανοιχτές πληγές καθώς και στο αναπνευστικό σύστημα ενός ζωντανού οργανισμού. Τα σωματίδια β (στρόντιο-90, άνθρακας-14, θείο-35 ) είναι ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας τα οποία παράγονται όταν διασπάται ο πυρήνας ενός ασταθούς ατόμου. Αποτελείται από αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και σε αντίθεση με τα σωματίδια α είναι περισσότερο διεισδυτικά καθώς μπορούν να εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα περίπου 20 mm. Η ακτινοβολία γ και οι ακτίνες X είναι υψηλής διεισδυτικότητας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ιώδιο-131, καίσιο-137, κοβάλτιο-60, ράδιο-226). Έχουν την ικανότητα να διαπεράσουν το ανθρώπινο σώμα και απαιτούνται αρκετά εκατοστά μολύβδου ή τσιμέντου για να ανακοπεί η πορεία τους. Ο εντοπισμός τους είναι εύκολος με ανιχνευτή ιωδιούχου νατρίου.



Πηγή: [www.nde-ed.org](http://www.nde-ed.org)

### 1.3 Μέτρηση της ραδιενέργειας

Ο ρυθμός διάσπασης σ' έναν αριθμό ραδιενεργών πυρήνων (δηλαδή πόσοι ραδιενεργοί πυρήνες διασπώνται μέσα σ' ένα δευτερόλεπτο), μετριέται σε Μπεκερέλ (Bq). Δηλαδή 1 Bq αντιπροσωπεύει μια διάσπαση το δευτερόλεπτο. Μια άλλη μονάδα που χρησιμοποιείται για το ίδιο μέγεθος είναι το Κιουρί (Curie).

$1 \text{ Κιουρί [Curie (Ci)]} = 3.7 \times 10^{10} \text{ διασπάσεις ανά sec (Βασική μονάδα ενεργότητας)}$

Μια συνηθισμένη μονάδα μέτρησης της ακτινοβολίας στον άνθρωπο ονομάζεται Ρεμ (Rem) η οποία αντιπροσωπεύει τη δόση απορροφηθείσας ραδιενέργειας. Το Ρεμ συχνά μετριέται ως मिलιρέμ. Υπάρχουν ακόμη οι μονάδες Roentgen, Req, Rad.

1 Μπεκερέλ (Becquerel) (Bq) = 1 διάσπαση ανά sec (μονάδα ενεργότητας)

1 Ρέντκεν Roentgen (R) =  $2.58 \times 10^{-4}$  Coulomb/Kg (Μονάδα δόσης, δηλ. πόσα φορτία προκαλούνται στη μονάδα μάζας).

1 Ράντ (rad) = 100 έργια ανά γραμμάριο ύλης =  $0,01 \text{ J/Kg}$  (Μονάδα απορροφούμενης δόσης)

1 Γκρέι [Gray (Gy)] =  $\approx 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/gr}$  (Μονάδα απορροφούμενης δόσης)

1 Ρεμ (rem) = 1 rem =  $Q \times \text{rad}$  ( $Q$ =συντελεστής βιολογικής δράσης) Μονάδα βιολογικής δράσης

## 1.4 Χρήση και επικινδυνότητα της ραδιενέργειας

---

Υπάρχουν πολλές πρακτικές εφαρμογές για τη χρήση της ραδιενέργειας. Πολλές ραδιενεργές πηγές χρησιμοποιούνται για ακαδημαϊκές και επιστημονικές χρήσεις, για ιατρικές, βιομηχανικές και γεωργικές εφαρμογές, σε πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, ακόμα και σε προϊόντα οικιακής και καθημερινής χρήσης όπως τα κινητά τηλέφωνα. Πιο συγκεκριμένα, τα διάφορα ακαδημαϊκά και επιστημονικά ιδρύματα χρησιμοποιούν πυρηνικά υλικά σε μαθήματα, εργαστηριακές επιδείξεις και πειραματική έρευνα.

Η ραδιενέργεια επιτρέπει στους ερευνητές να μελετούν τον πλανήτη σε γεωμορφολογικό και αναπτυξιακό επίπεδο, από τον τρόπο που αναπτύσσεται ένα φυτό σε ένα συγκεκριμένο έδαφος, τα διάφορα είδη ρύπανσης του αέρα και των υδάτων, ακόμα και στην ανακάλυψη νέων κοιτασμάτων πετρελαίου. Στον κλάδο της αρχαιολογίας, οι επιστήμονες χρησιμοποιούν ραδιενεργές ουσίες για να καθορίσουν τις ηλικίες των απολυθωμάτων και άλλων αντικειμένων μέσω μίας διαδικασίας που ονομάζεται χρονολόγηση με άνθρακα (carbon dating). Μερικές από τις βιομηχανικές εφαρμογές της ραδιενέργειας συναντάμε σε αυτόματα συστήματα ελέγχου ποιότητας σε γραμμές παραγωγής όπου συντελούν σε διάφορες εργασίες όπως στη μέτρηση στάθμης ενός υγρού σε δοχείο ή στην πυκνότητα του καπνού των τσιγάρων. Ο γεωργικός κλάδος κάνει χρήση της ακτινοβολίας για τη βελτίωση της παραγωγής και συσκευασίας τροφίμων. Μια τέτοια εφαρμογή είναι η διαδικασία αναστολής της αναπαραγωγής εντόμων με σκοπό τη μείωση του πληθυσμού τους (τεχνική στείρωσης εντόμων SIT) έτσι ώστε να μην επιρεάζουν την ανάπτυξη διαφόρων φυτών ή τροφίμων.

Όσο για τον τομέα της ιατρικής, υπάρχει ευρεία χρήση της ραδιενέργειας και των ραδιο-ισότοπων σε πρακτικές εφαρμογές όπως στη διάγνωση ασθενειών, στη θεραπεία ακόμα και στην αποστείρωση ιατρικών εργαλείων. Τα ραδιο-ισότοπα αποτελούν ουσιαστικό μέρος των ιατρικών διαγνωστικών διαδικασιών. Σε συνδυασμό με τις συσκευές απεικόνισης οι οποίες εκπέμπουν ακτίνες γ, μπορούν να μελετηθούν διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε διάφορα μέρη του σώματος. Ένα

πλεονέκτημα της χρήσης ακτίνων X είναι ότι τα οστά και οι μαλακοί ιστοί μπορούν να απεικονιστούν με μεγάλη ευκρίνεια. Επίσης, κατά τη χρήση ραδιοφαρμάκων για τη διάγνωση, μια ραδιενεργή δόση χορηγείται στον ασθενή με αποτέλεσμα η δραστηριότητα στο εκάστοτε όργανο να μπορεί να μελετηθεί είτε με δισδιάστατη εικόνα είτε με μία ειδική τεχνική που ονομάζεται τομογραφία (τρισδιάστατη εικόνα). Το πιο διαδεδομένο διαγνωστικό ραδιο-ισότοπο είναι το τεχνητό  $^{99m}\text{Tc}$  (ακτίνες  $\gamma$ ) το οποίο έχοντας χαμηλή ακτινοβολία και χρόνο ζωής 6 ωρών προκαλεί στον ασθενή την ελάχιστη δυσφορία. Χρησιμοποιείται κυρίως για την διάγνωση όγκων, για το συκώτι, για την μελέτη της καρδιάς, των πνευμόνων, των νεφρών καθώς και για την κυκλοφορία του αίματος. Μία ακόμη σημαντική χρήση των ραδιο-ισότοπων είναι για βιομηχανικές αναλύσεις σε εργαστήρια. Τα ραδιο-ισότοπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις χαμηλών συγκεντρώσεων ορμονών, ενζύμων ή για τον εντοπισμό του ιού της ηπατίτιδας καθώς και μια σειρά άλλων ουσιών από το δείγμα αίματος του ασθενούς.

Όπως για τη διάγνωση, έτσι και για τη θεραπεία, η χρήση ραδιο-ισότοπων είναι σημαντική. Μία από τις σημαντικότερες θεραπείες με ραδιο-ισότοπα για την καταπολέμηση καρκινικών νεοπλασιών, είναι η βραχυθεραπεία η οποία χορηγείται στον ασθενή είτε εξωτερικά με δέσμη ακτίνας  $\gamma$  από δέσμη κοβαλτίου  $^{60}\text{Co}$ , είτε εσωτερικά με μικρή δόση ακτίνων  $\gamma$  ή  $\beta$ . Για τη θεραπεία καρκίνου του θυροειδούς χρησιμοποιείται ιώδιο  $^{131}\text{I}$  το οποίο ίσως είναι και το πιο επιτυχημένο είδος θεραπείας καρκίνου. Μία νέα εφαρμογή θεραπείας είναι η λεγόμενη Στοχευμένη Άλφα Θεραπεία (Target Alpha Therapy) η οποία εξιδεικεύεται σε καταστάσεις μεταστάσεων καρκίνου.

Ως προς τη χρήση της ραδιενέργειας δεν θα μπορούσαν να παραλειφθούν τα πυρηνικά εργοστάσια και τη λειτουργία τους για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ο πυρήνας του αντιδραστήρα αποτελείται από 80 έως 100 τόνους ουρανίου σε παραπάνω από 30.000 ράβδους καυσίμων. Οι ράβδοι αποδίδουν τη θερμότητα που παράγουν στο νερό, σε μία σειρά ατμοπαραγωγών (μπόιλερ) ή άμμεσα. Ο ατμός συνεχίζει την πορεία του για την κίνηση ατμοστρόβιλων οι οποίοι συνδέονται με μία ηλεκτρική γεννήτρια. Ακολουθεί η ψύξη του κορεσμένου ατμού που εξέρχεται από τους ατμοστρόβιλους, ο οποίος συμπικνώνεται και διοχετεύεται και πάλι στο σύστημα. Οι μεγάλες ποσότητες ατμού που εξέρχονται από τους πύργους ψύξης, προέρχονται από κύκλωμα νερού ψύξης που είναι ανεξάρτητο από το σύστημα ατμοπαραγωγής. Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός είναι του ίδιου τύπου με αυτόν που δημιουργείται με άλλους τρόπους, το λιγνίτη, το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο. Η διαφορά τους οφείλεται στην πηγή της θερμότητας που χρησιμοποιείται για να παράγει τον ατμό.

Η πυρηνική ενέργεια είναι μια καθαρή μορφή ενέργειας από την άποψη ότι το ραδιενεργό υλικό παράγει πολύ περισσότερη ενέργεια συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα. Από τα πυρηνικά εργοστάσια εκλύονται λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Σήμερα το 33% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται



στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι πυρηνική. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της Γαλλίας όπου το 80% της ηλεκτροπαραγωγής προέρχεται από πυρηνική ενέργεια. Ήδη υπάρχουν 200 περίπου πυρηνικοί σταθμοί στην Ε.Ε, ενώ βρίσκονται ακόμα υπό κατασκευή και άλλα πυρηνικά εργοστάσια.

Ως προς την επικινδυνότητα της ακτινοβολίας, ένας ανθρώπινος οργανισμός εκτίθεται συχνά σε μικρές ποσότητες επιβλαβούς ακτινοβολίας από φυσικές ή απο ανθρώπογενείς πηγές. Μεγαλύτερο κίνδυνο εμπεριέχουν οι διεισδυτικές ιοντίζουσες ακτίνες που περιλαμβάνουν τις ακτίνες Χ και τα κινούμενα ατομικά σωματίδια. Το πρώτο συστατικό του οικοσυστήματος που μολύνεται έπειτα από μια διαρροή ραδιενεργού υλικού στην ατμόσφαιρα είναι ο αέρας. Για το λόγο αυτό η εισπνοή ατμοσφαιρικού αέρα μολυσμένο από ραδιενέργεια είναι περισσότερο επιβλαβής από τροφή ή νερό μολυσμένο επίσης από ραδιενέργεια.

Το μεγαλύτερο μέρος των ραδιενεργών υλικών καταλήγει στο έδαφος, η παραμονή των υλικών εκεί εξαρτάται από το χρόνο υποδιπλασιασμού τους καθώς και από το πώς απορροφώνται από το έδαφος με αποτέλεσμα τα ραδιενεργά άτομα να επηρεάζουν το νερό, τα φυτά, τα ζώα και τον άνθρωπο. Πιο συγκεκριμένα, ένας ανθρώπινος οργανισμός μπορεί να δεχτεί ραδιενέργεια σε ποσοστό περίπου 54% από το ραδιενεργό αέριο ραδόνιο που υπάρχει στο έδαφος, 15% από ιατρικές εφαρμογές, 11% από ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν φυσικά μέσα μας ή που λαμβάνουμε μέσω τροφών, 8% από ραδιενεργά υλικά στο φλοιό της γης, 8% από κοσμικές ακτινοβολίες, 3% από καταναλωτικά είδη (κάπνισμα, μαγείρεμα φυσικό αέριο κ.α), 1% από πυρηνικά εργοστάσια, πυρηνικές δοκιμές και μεταφορά ραδιενεργών υλικών. Χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας δεν προκαλούν έντονα συμπτώματα καθώς οι επιδιορθωτικοί μηχανισμοί του ανθρώπου προλαβαίνουν να αποκαταστήσουν τις προκαλούμενες βλάβες.

Ωστόσο, οι επιδιορθωτικοί μηχανισμοί δεν είναι πάντα τέλει. Έτσι, ορισμένες βλάβες παραμένουν ή επιδιορθώνονται πλημμελώς και το κύτταρο υφίσταται τις συνέπειες. Σε πολλές περιπτώσεις το κύτταρο γίνεται καρκινικό, ενώ αν η βλάβη συμβεί στα γαμετικά κύτταρα (ωάρια, σπερματοζώαρια) μεταφέρεται και στις επόμενες γενιές. Με άλλα λόγια οι επιπτώσεις της έκθεσης σε ραδιενέργεια συχνά διαπιστώνονται όχι μόνο στα άτομα που εκτίθενται σε αυτήν αλλά και στους απογόνους τους. Φαινόμενα όπως η ανάπτυξη καρκίνου ή η εμφάνιση κληρονομήσιμων ανωμαλιών και βλαβών του DNA (σύνδρομο DOWN, αυτισμός, μεσογειακή αναιμία κ.α) μπορούν να οδηγήσουν στο θάνατο σε διάστημα εβδομάδων ή και ημερών. Στοχαστικά αποτελέσματα και η συχνότητά τους εξαρτάται από τη δόση της ακτινοβολίας που τα προκάλεσε. Σε υψηλές εκθέσεις ακτινοβολίας για σημαντικό χρονικό διάστημα και αν η δόση είναι υψηλή, ένας αριθμός των κυττάρων μπορεί να νεκρωθεί. Αυτό προκαλεί σοβαρή βλάβη στο άτομο που έχει εκτεθεί, όπως για παράδειγμα εγκαύματα στο δέρμα, τριχόπτωση, στειρότητα, βλάβη στα αγγεία, στα συστήματα παραγωγής και το ανοσοποιητικό σύστημα. Σε πολύ υψηλές δόσεις η ανάρωση δεν είναι δυνατή, οδηγώντας στο θάνατο σε διάστημα εβδομάδων ή και ημερών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗΣ ΣΕ ΥΛΙΚΑ

#### 2.1 Εισαγωγή στους πυρηνικούς αντιδραστήρες

---

Όταν λέμε πυρηνικός αντιδραστήρας, ουσιαστικά εννοούμε μια τεράστια δεξαμενή, όπου το πυρηνικό καύσιμο, υφίσταται ελεγχόμενη σχάση και απελευθερώνει θερμότητα. Με απλά λόγια τα άτομα του εν λόγω πυρηνικού υλικού, διασπώνται και απελευθερώνουν νετρόνια. Τα νετρόνια με τη σειρά τους διασπών άλλα άτομα με τελικό αποτέλεσμα μια γεωμετρικά αυξανόμενη αλυσιδωτή αντίδραση. Ο πυρηνικός αντιδραστήρας εκπέμπει έντονη ακτινοβολία που αξιοποιείται στη παραγωγή ραδιοϊσότοπων.

Μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα υπάρχουν και οι “ράβδοι ελέγχου” που συγκρατούν την αλυσιδωτή αντίδραση σε σταθερό ρυθμό ανάπτυξης έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή ροή της θερμότητας. Ένα "ψυκτικό μέσο" (που μπορεί να είναι αέριο ή υγρό – πχ νερό-) κυκλοφορεί μέσα στον αντιδραστήρα και θερμαίνεται. Στη συνέχεια αυτό οδηγείται σε ένα "εναλλάκτη θερμότητας" όπου προκαλεί βρασμό σε νερό που υπάρχει εκεί. Ο παραγόμενος ατμός στη συνέχεια θέτει σε κίνηση στρόβιλους που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα αλλά και κινητική ενέργεια. Συνοπτικά, σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα σχάσης, η ενέργεια που απελευθερώνεται από τη σχάση του πυρηνικού καυσίμου χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού, με τον οποίο τίθεται σε λειτουργία ένας στρόβιλος που με τη σειρά του περιστρέφει μία ηλεκτρογεννήτρια.

Στην πλειοψηφία τους, οι σύγχρονοι πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ως καύσιμο εμπλουτισμένο ουράνιο ή μεικτό οξειδίο ενώ κάποιιοι χρησιμοποιούν φυσικό ουράνιο (U). Το καύσιμο βρίσκεται σε ειδικούς φορείς (containers) σε μορφή ράβδων καυσίμου (fuel pins). Αυτοί οι ράβδοι τοποθετούνται με καθορισμένη διάταξη μέσα στον επιβραδυντή (moderator), ο οποίος είναι γραφίτης ή βαρύ ύδωρ και σκοπός του είναι να επιβραδύνει τα νετρόνια που παράγονται από τις σχάσεις. Οι ρυθμιστικές ράβδοι που χρησιμεύουν στη διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού σχάσης, εισέρχονται στον πυρήνα του επιβραδυντή και η θέση τους μεταβάλλεται έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός σχάσης. Όταν οι ράβδοι είναι βαθύτερα μέσα στον πυρήνα, επιβραδύνουν περισσότερα νετρόνια και έτσι μειώνεται ο ρυθμός σχάσεων. Το αντίθετο συμβαίνει όταν οι ράβδοι αποσύρονται.

Ένα ψυκτικό υλικό κυκλοφορεί υπό πίεση μέσα στα λεγόμενα κανάλια του επιβραδυντή. Σκοπός της κυκλοφορίας του ψυκτικού είναι η απαγωγή της θερμικής ενέργειας και η μεταφορά της σε εναλλάκτη θερμότητας. Ο επιβραδυντής βρίσκεται στο εσωτερικό χαλύβδινου προστατευτικού περιβλήματος κατασκευασμένου έτσι ώστε να αντέχει στις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες στο εσωτερικό του

αντιδραστήρα. Γύρω από το χαλύβδινο περίβλημα υπάρχει θωράκιση από σκυρόδεμα που εμποδίζει τη ραδιενέργεια να φτάσει στους χειριστές του αντιδραστήρα και το περιβάλλον, τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας όσο και σε περίπτωση ατυχήματος.

## 2.2 Επιπτώσεις της ραδιενέργειας στα υλικά των πυρηνικών αντιδραστήρων

---

Η οικονομική βιωσιμότητα της πυρηνικής ενέργειας θα αυξηθεί με αύξηση της κατανάλωσης του καυσίμου ( το ποσοστό των διασπώμενων ατόμων που διασπώνται (καίγονται) προτού αφαιρεθεί το καύσιμο, εκφράζεται επίσης σε  $\text{MWdkg}^{-1}$  , η ισοδύναμη ενέργεια που προκύπτει από 1kg σχάσιμο υλικού. Σε ερευνητικούς αντιδραστήρες, η κατανάλωση του καυσίμου είναι περίπου  $1\text{MWdkg}^{-1}$  ενώ στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος κυμαίνεται από 30 έως  $50\text{MWdkg}^{-1}$ . Σε περιπτώσεις πιο γρήγορων αντιδραστήρων, η κατανάλωση του καυσίμου φτάνει τα 150 με  $200\text{MWdkg}^{-1}$ . Ο περιορισμός στην κατανάλωση του καυσίμου δεν εξαρτάται τόσο από το ίδιο το καύσιμο, όσο από τη ζημιά που μπορούν να προκαλέσουν τα παραγόμενα νετρόνια επηρεάζοντας τα δομικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα. Στα δομικά αυτά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται οι ράβδοι καυσίμου (λεπτοί μεταλλικοί σωλήνες), οι οποίοι περιέχουν το καύσιμο, τα συσκευασμένα δοχεία τα οποία περιέχουν έναν αριθμό ράβδων καυσίμου που απαιτούνται από τις σχεδιαστικές παραμέτρους του καυσίμου, οι δεξαμενές στις οποίες ο πυρήνας είναι βυθισμένος, καθώς και πολλά άλλα παρόμοια χαρακτηριστικά [1].

Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί όπου η ραδιενέργεια μπορεί να προκαλέσει βλάβη, οι ατομικές μετατοπίσεις και οι αλλαγές σε μοριακό επίπεδο. Τις ατομικές μετατοπίσεις τις συναντάμε στα μέταλλα ενώ τις μοριακές αλλαγές στα αμέταλλα. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μηχανισμών συμβαίνει σε ημι-αγωγούς και μονωτές. Σε οργανικά υλικά κάποιες από τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας είναι ο πολυμερισμός (χημικές αντιδράσεις που δημιουργούν ενώσεις με μακρομόρια μεγάλου πλήθους ατόμων που έχουν μεγάλο μοριακό βάρος), η χημική διάσπαση και το cross-linking<sup>1</sup>. Η αιτία είναι ότι η ιονίζουσα ραδιενέργεια διασπά το νερό και παράγει πολλές ελεύθερες (χημικές) ρίζες<sup>2</sup> υδρογόνου, οξυγόνου και υπεροξειδίου του υδρογόνου.

---

<sup>1</sup> όρος που αφορά τη σύνδεση ενός μορίου πολυμερούς με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μεγαλύτερου. Η διαδικασία αυτή κάνει το πολυμερές πιο σκληρό και αυξάνει το σημείο τήξης της θερμοκρασίας.

<sup>2</sup> ένα άτομο, ένα μόριο ή ένα ιόν που έχει ένα ή παραπάνω αζευγάρωτα ηλεκτρόνια, και μπορεί να είναι αρνητικά, θετικά ή ουδέτερα φορτισμένα

## 2.3 Τα βασικά της βλάβης από ακτινοβόληση

---

Στο εσωτερικό ενός κρυσταλλικού πλέγματος, τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με τα άτομα του πλέγματος και τους μεταδίδουν ένα μέρος της ενέργειάς τους.

Τέτοιου είδους διεργασίες μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στο κρυσταλλικό πλέγμα και είναι τριών τύπων :

- 1) παραγωγή ατόμων του πλέγματος μετατοπισμένων από τις αρχικές τους θέσεις ,
- 2) αλλαγές στη χημική σύνθεση από νετρόνια που έχουν παραχθεί από μετατροπές των ατόμων του πλέγματος,
- 3) μεγάλη παραγωγή ηλεκτρονίων από ιονισμό ατόμων (τα οποία δεν προκαλούν μόνιμη βλάβη στα μέταλλα).

Οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων που προσπίπτουν και του πλέγματος, μπορεί να είναι ελαστικές ή μη ελαστικές. Στις ελαστικές συγκρούσεις, η κινητική ενέργεια όλων των σωματιδίων διατηρείται. Η κινητική ενέργεια  $T$  που μεταφέρεται από ένα τυχαίο σωματίδιο μάζας  $m$  σε ένα άτομο πλέγματος μάζας  $M$  ορίζεται ως :

$$T = [4 * M * m / (M+m)^2] * [ E * \sin^2 (\theta/2) ]$$

Όπου  $E$ , η ενέργεια του σωματιδίου και  $\theta$ , η γωνία σκέδασης.

Η μέγιστη τιμή για την κινητική ενέργεια  $T$  ( $T_{max}$ ) προκύπτει από τη μετωπική σύγκρουση όταν η γωνία σκέδασης είναι  $\theta=180^\circ$ . Στις ανελαστικές συγκρούσεις, μέρος της ενέργειας του σωματιδίου χάνεται, μετατρέπεται σε θερμότητα ή άλλες μορφές ραδιενέργειας. Συνεπώς, η ενέργεια στην προκειμένη περίπτωση δίνεται από τη σχέση :

$$E=T+E'+Q$$

Όπου :  $E$  η αρχική κινητική ενέργεια του σωματιδίου,

$T$  και  $E'$  οι κινητικές ενέργειες του ατόμου του πλέγματος και του σωματιδίου, αντίστοιχα μετά τη σύγκρουση και

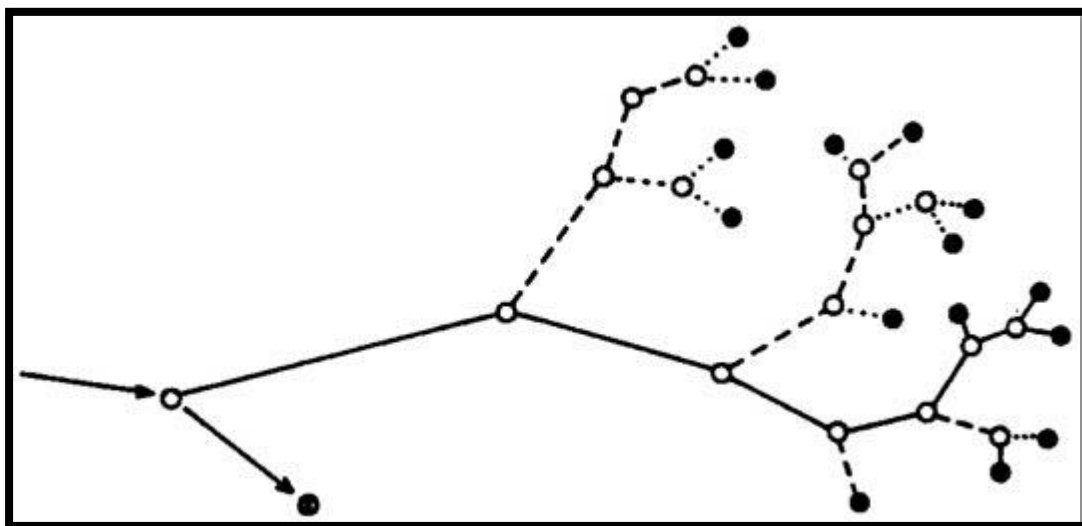
$Q$  η ανελαστική απώλεια.

Τα άτομα που μετατοπίζονται από τις θέσεις στους στο πλέγμα, ονομάζονται PKAs (primary knock on atoms) και μπορούν να έχουν τιμές ενέργειας από 0 μέχρι  $T_{max}$ .

Το ενεργειακό φάσμα των PKAs εξαρτάται από την ενέργεια και τον τύπο των σωματιδίων. Οι διαφορές στο ενεργειακό φάσμα των PKAs οδηγούν σε αλλαγές στην έκταση της φθοράς. Ο σχηματισμός ενός PKA ουσιαστικά έχει σαν αποτέλεσμα ένα ζεύγος κενής θέσης-διάμεσο (ζεύγος Frenkel). Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την μετατόπιση ονομάζεται οριακή ενέργεια  $T_d$ , και οι τιμές της κυμαίνονται από 20 eV έως 50 eV για όλα τα μέταλλα. Τα άτομα του πλέγματος μπορούν να επιτύχουν αυτή την ενέργεια σε συγκρούσεις με φορτισμένα ηλεκτρόνια μεγαλύτερης ενέργειας από 1 MeV, φορτισμένα νετρόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από 1 keV, ή φορτισμένα ιόντα μεγαλύτερης ενέργειας από 100 eV. Η μεταφορά ενέργειας μικρότερης από την

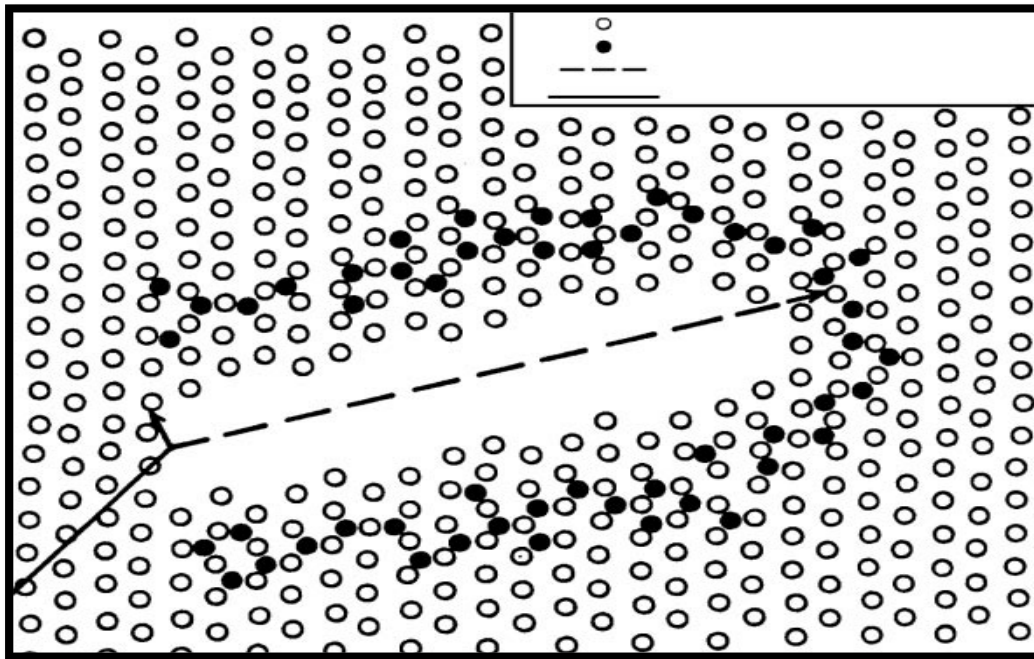
οριακή  $T_d$  μπορεί να οδηγήσει σε τοπική αύξηση στην ατομική ταλάντωση (τοπική αύξηση στη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμική ακίδα-thermal spike). Τα μετατοπισμένα άτομα ξεκινούν μία αλληλουχία αντιδράσεων που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός μεγάλου αριθμού “κενών θέσεων-διαμέσων ζευγών” όπως απεικονίζεται σχηματικά στο διάγραμμα 1.

*Διάγραμμα 1: Αλληλουχίας συγκρούσεων προκαλούμενες από σωματιδιακή ακτινοβόληση σε ένα μεταλλικό πλέγμα.*



Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του σωματιδίου τόσο ομαλότερο είναι το αποτέλεσμα των διακλαδώσεων στις αλληλεπιδράσεις. Αυτό οδηγεί σε μία συλλογική ατομική αναδιάταξη σε αυτή την περιοχή που ονομάζεται τοπική ακίδα μετατόπισης (displacement spike), με το σχηματισμό ενός τυχαίου και ακανόνιστου συμπλέγματος από κενές θέσεις στον πυρήνα, περικυκλωμένα από έναν μανδύα ενδιάμεσων ατόμων. Μία σχηματική αναπαράσταση της τοπικής αυτής ακίδας μετατόπισης απεικονίζεται στο διάγραμμα 2.

Διάγραμμα 2: Τοπικής ακίδα μετατόπισης συνδεδεμένη με αλληλουχία μετατοπίσεων.



- : κανονικό άτομο
- : διάμεσο άτομο
- : διαδρομή πρωταρχικού σωματιδίου
- : διαδρομή σωματιδίου που μετατοπίστηκε από την αρχική του θέση (PKAs)

Ο αριθμός των ζευγών αυτών (Frenkel pairs),  $\nu(T)$ , που διαμορφώνεται από PKAs με κινητική ενέργεια  $T$  υπολογίζεται από το μοντέλο NRT (Norgett-Robinson-Torrens) σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$\nu(T) = k * [ T_{dsm} / 2 * (T_d) ]$$

όπου  $T_{dsm} = T - Q$ , το οποίο είναι μέρος της ενέργειας των PKAs αντίστοιχη της ελαστικής σύγκρουσης που οδηγεί όμως σε μόνιμη ραδιενεργή βλάβη,  $Q$  είναι η συνολική ενέργεια των ανελαστικών απωλειών από αλληλεπιδράσεις σε μια σύγκρουση,  $k$  είναι η απόδοση της μετατόπισης εξαρτώμενη από την κινητική ενέργεια  $T$  και η ενέργεια  $T_d$  είναι η έννοια της οριακής μέσης ενέργειας των μετατοπίσεων σε ποικίλες κρυσταλλογραφικές κατευθύνσεις [2]. Η βλάβη που προκύπτει από τις μετατοπίσεις εκφράζεται ως όρος μετατοπίσεων ανά άτομο (displacements per atom) και υπολογίζεται από την δόση νετρονίων, το ενεργειακό τους φάσμα καθώς και από την αποτελεσματική μετατόπιση ανά τομέα, η οποία δίνει την πιθανότητα της μετατόπισης ενός ατόμου στο συγκεκριμένο πλέγμα ως

αποτέλεσμα συγκρούσεων με προσπίπτουντα νετρόνια. Ο ορισμός και η χρήση των  $\text{dpa}$  ως στοιχείο ραδιενεργής βλάβης ξεκίνησε και συγγράφθηκε από τα μέσα του 1970. Πριν από αυτό, η δόση νετρονίων ( $n \text{ cm}^{-2}$ ), ως προϊόν έντασης της ροής ( $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) γρήγορων νετρονίων πάνω από μια συγκεκριμένη ενέργεια (συνήθως  $0,1\text{MeV}$ ) και ο χρόνος ακτινοβολίας, ήταν τα στοιχεία που χρησιμοποιούνταν για τον υπολογισμό της ζημιάς. Οι συνθήκες λειτουργίας σε έναν τυπικό πυρηνικό αντιδραστήρα περιλαμβάνουν τη δόση, τη ροή, τον ατομικό δείκτη μετατοπίσεων, τη ζημιά από τις μετατοπίσεις ανά άτομο ( $\text{dpa}$ ), μαζί με άλλες σημαντικές παραμέτρους που δίνονται στον πίνακα 1 για να βοηθήσουν τον αναγνώστη να εκτιμήσει και να συγκρίνει τα δεδομένα τόσο στην παλιά όσο και στην πρόσφατη βιβλιογραφία. Τα δεδομένα που δίνονται στον πίνακα 1 επισημαίνουν το λόγο για τον οποίο υπάρχει σημαντική αύξηση της βλάβης λόγω ραδιενέργειας από τους ερευνητικούς αντιδραστήρες στους αντιδραστήρες ισχύος και από τους θερμικούς στους ταχείας/σύνηξης αντιδραστήρες.

Πίνακας 1: Τυπικές λειτουργικές συνθήκες σε πυρηνικούς αντιδραστήρες

Παράμετροι	Ερευνητικός αντιδραστήρας	LWR (Αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος)	PHWR (Αντιδραστήρας πεπιεσμένου βαρέου ύδατος)	FBR (Αντιδραστήρας εκτροφής)	Αντιδραστήρας σύντηξης (tokamak)
Θερμοκρασία (K)	<370	~575	~575	~825	~600-1300
Ροή νετρονίων ( $n\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ )	$\sim 10^{12}$	$\sim 10^{14}$	$\sim 10^{14}$	$\sim 5 \times 10^{15}$	$\sim 5 \times 10^{15}$ (14MeV)
Δόση νετρονίων ( $n\text{ cm}^{-2}$ )	$\sim 10^{18}$	$\sim 10^{22}$	$\sim 10^{22}$	$\sim 3 \times 10^{23}$	$\sim 3 \times 10^{23}$ (14MeV)
Ρυθμός ατομικών μετατοπίσεων ( $\text{dpa s}^{-1}$ )	$\sim 10^{-13}$	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$
Κατανάλωση καυσίμου ( $\text{MWdkg}^{-1}$ )	~1	30-40	7-10	150-200	
Ποσοστό % Ατόμων που διασπώνται	<0.1	~3-4	~1	~15-20	
Ραδιενεργή ζημιά (dpa)		~1	~1	~100	~100
Παραγωγή Ηλίου ( $\text{appm yr}^{-1}$ )	Αμελητέα	~1	~1	~10	

Όπου a, τα νετρόνια σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης τα οποία έχουν ενέργεια περίπου ίση με 14MeV. Τα διασπόμενα νετρόνια έχουν αρχική ενέργεια που είναι περίπου ίση με 2MeV, η ροή και η δόση δείχνουν ότι οι αντιδραστήρες σχάσης είναι για ταχέα νετρόνια (νετρόνια με ενέργεια ίση με 0.1 MeV). Ο όρος dpa (displacements per atom) λαμβάνει υπόψη από το φάσμα ενεργειών των νετρονίων με την ενσωμάτωση των μέγιστων και των ελαχίστων τιμών.

Όπου b, η κατανάλωση καυσίμου είναι ένα μέτρο της έκτασης της σχάσης του καυσίμου. Η μονάδα  $\text{MWdkg}^{-1}$  μετράει την ενέργεια σχάσης που παράγεται από ένα διασπώμενο άτομο ανά μονάδα μάζας,  $10\text{ MWdkg}^{-1}$  είναι περίπου ισοδύναμη με το 1% της σχάσης στο καύσιμο.



## 2.4 Μακροσκοπικές επιπτώσεις από τη ραδιενεργό βλάβη σε ακτινοβολημένα υλικά (Σκλήρυνση με ακτινοβόληση)

---

Οι γενικές επιπτώσεις των ακτινοβολημένων υλικών από νετρόνια ως προς τη μηχανική τους συμπεριφορά είναι : i) η αύξηση του ορίου διαρροής (σκλήρυνση με ακτινοβόληση) ii) η αύξηση της απόλυτης ελαστικής δύναμης, η οποία είναι μικρότερη από την αύξηση του ορίου διαρροής, iii) η μείωση του δείκτη της ενδοτράχυνσης<sup>3</sup>, iv) η ελάττωση της μορφής και της συνολικής επιμήκυνσης.

Αυτές οι επιπτώσεις παρουσιάζονται για ένα τυπικό κράμμα κυβικού χωροκεντρωμένου συστήματος<sup>4</sup> (Body centered Cubic) όπως ο μαλακός χάλυβας (διάγραμμα 4) καθώς επίσης και για ένα τυπικό κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα<sup>5</sup> (Face Centered Cubic) όπως ο πολυκρυσταλλικός<sup>6</sup> χαλκός (διάγραμμα 5).

Μία ενδιαφέρουσα εκδοχή είναι ότι σε πολύ υψηλές δόσεις (ραδιενέργειας) το σημείο διαρροής εμφανίζεται στο διάγραμμα (σ-ε) τάσεων-παραμορφώσεων χαλκού. Συνεπώς οι δομικές ατέλειες που παράγονται από την ακτινοβόληση εμποδίζουν τις μετατοπίσεις που συμβάλλουν στη δημιουργία κενών, σχηματίζοντας ατμόσφαιρες γύρω τους. Στις αλληλεπιδράσεις που συναντάμε σε αυτό το μοντέλο σκλήρυνσης, οι διάμεσοι βρόχοι είναι αυτοί που σχηματίζουν τις ατμόσφαιρες γύρω από τις μετατοπίσεις [3]. Το σχήμα στο διάγραμμα 3 δείχνει μία περίληψη των επιδράσεων της ακτινοβολίας στην οποία η θερμοκρασία και οι δόσεις νετρονίων ορίζουν ποιές επιπτώσεις ακτινοβολίας λαμβάνουν χώρα στους χάλυβες που απεικονίζονται σχηματικά.

---

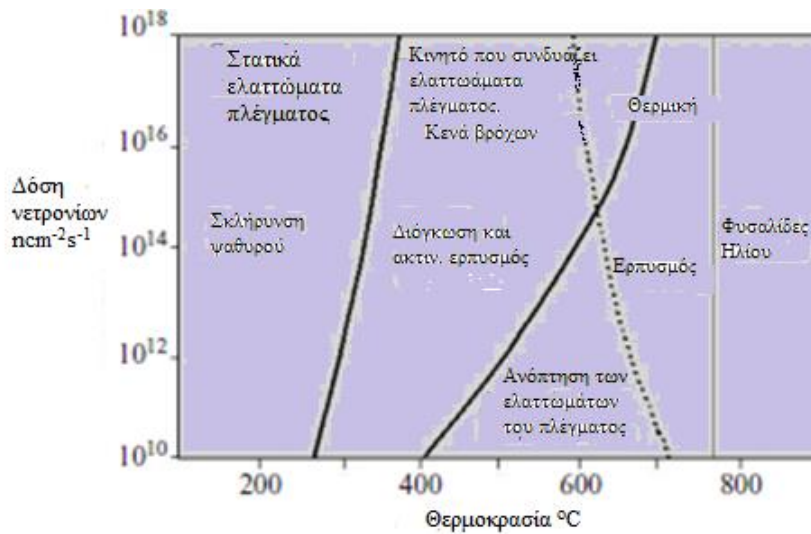
<sup>3</sup> μέθοδος αύξησης της αντοχής και της σκληρότητας ενός μεταλλικού υλικού (μετάλλου ή κράμματος) με παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής

<sup>4</sup> το κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα είναι τύπος κρυσταλλικής δομής ενός υλικού όπου τα άτομα τοποθετούνται στις κορυφές της αντίστοιχης κυψελίδας (γεωμετρική διάταξη των ατόμων του στοιχειώδους κυττάρου) και ένα άτομο τοποθετείται στο κέντρο της κυψελίδας.

<sup>5</sup> το κυβικό ενδοκεντρωμένο σύστημα είναι τύπος κρυσταλλικής δομής ενός υλικού όπου 8 άτομα είναι διατεταγμένα στις κορυφές της κυβικής κυψελίδας και 6 άτομα είναι τοποθετημένα στα κέντρα των εδρών του κύβου.

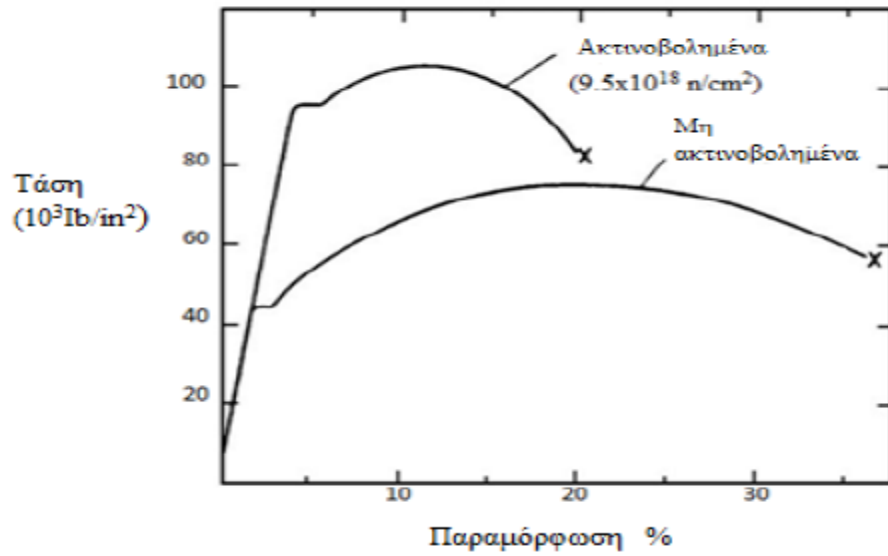
<sup>6</sup> πολυκρυσταλλικά υλικά (μέταλλα ή κράμματα) είναι αυτά που αποτελούνται από πολλούς κρυσταλλικούς κόκκους με τυχαίο προσανατολισμό και είναι συνήθως ισότροπα ή σχεδόν ισότροπα (έχουν την ιδιότητα να διατηρούν σε όλο τον όγκο τους τις ίδιες ιδιότητες).

Διάγραμμα 3: Θερμοκρασία δόσης νετρονίων πάνω από την οποία πραγματοποιούνται διάφορες επιπτώσεις ακτινοβολίας στους χάλυβες.

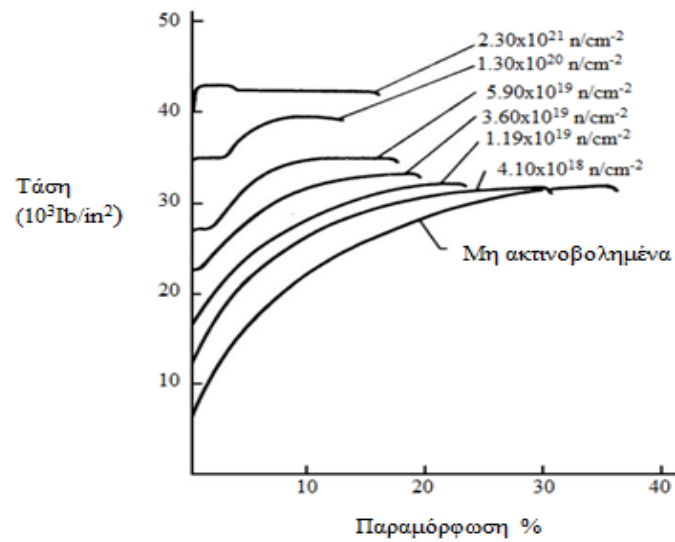


Ο Rodriguez (1984) ανέλυσε τη σκλήρυνση μέσω ακτινοβόλησης σε θερμικά και μη θερμικά συστατικά ροής πίεσης. Τα εμπόδια των μετατοπίσεων μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες: μικρής εμβέλειας (ελέγχοντας το θερμικό συστατικό της ροής πίεσης) και μεγάλης εμβέλειας (ελέγχοντας αυτό που εμποδίζει το μη θερμικό συστατικό) ανάλογα με την απόσταση πάνω από την οποία η δύναμη που ασκείται από το εμπόδιο, εκτείνεται. Η ακτινοβόληση εμφανίζεται για να βελτιώσει τις μετατοπίσεις τόσο της μικρής όσο και της μεγάλης εμβέλειας [4].

Διάγραμμα 4: Η αλλαγή στις θερμοκρασιακές ιδιότητες ενός μαλακού χάλυβα, που προκύπτει από την ακτινοβόληση των νετρονίων [5].



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα (σ-ε) τάσεων-παραμορφώσεων για έναν πολυκρυσταλλικό χαλκό που δοκιμάστηκε στους 20°C έπειτα από ακτινοβόληση στις δόσεις που υποδεικνύονται στο διάγραμμα [6].



## 2.5 Ευθραυστότητα μέσω ακτινοβόλησης

---

Η ευθραυστότητα μέσω της ακτινοβόλησης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση πολλών εξαρτημάτων των αντιδραστήρων. Η απώλεια της ολκιμότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασία της ακτινοβόλησης, της προακτινοβολημένης μικροδομής και της ροής. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η ευθραυστότητα αποτελεί συνέπεια της σκλήρυνσης μέσω ακτινοβόλησης με ελλατώματα, δηλαδή ένα σύμπλεγμα διαλυμένης ουσίας ατόμων και έχει ως συνέπεια μετατοπισμένα εμπόδια μικρής και μεγάλης εμβέλειας που προκύπτουν από αυτά. Αυτές οι επιπτώσεις είναι ουσιαστικά

- α) αύξηση της μετάβασης της θερμοκρασίας σε όλκιμα και ψαθυρά υλικά σε κράμματα κυβικού χωροκεντρομένου συστήματος,
- β) ελλάτωση στη μορφή και την ολική επιμήκυνση,
- γ) μειωμένη χωρητικότητα της ενδοτράχυνσης.

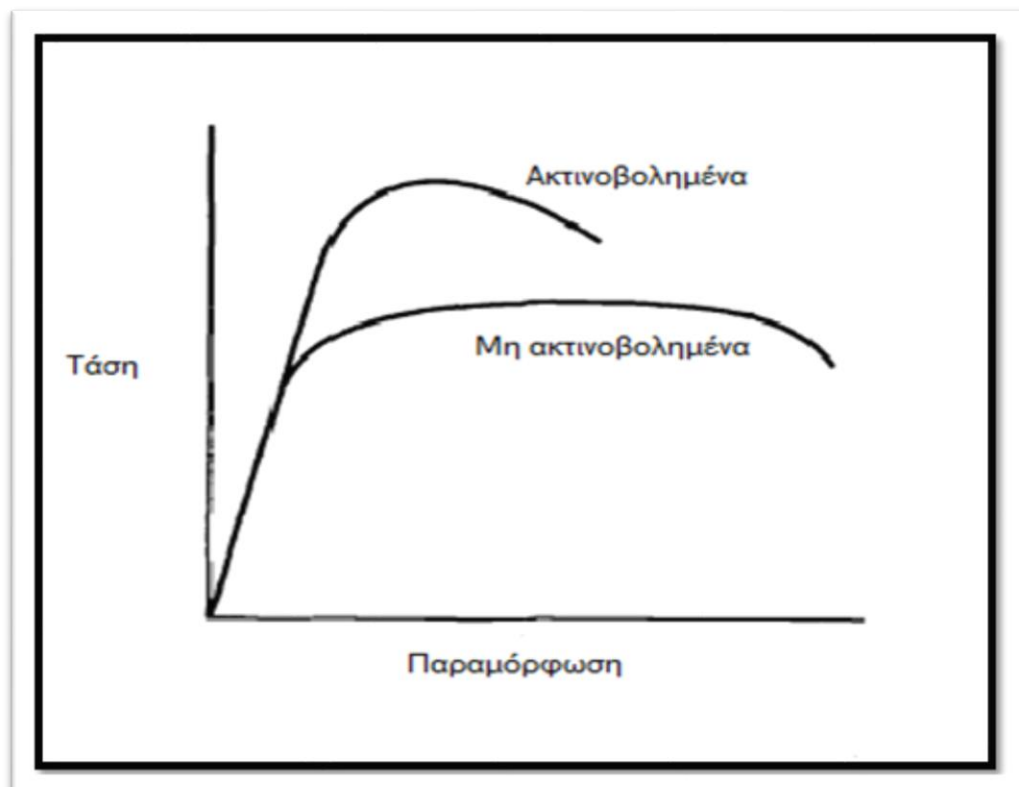
Σε υψηλές θερμοκρασίες ( $>0,5T_m$ ), η ευθραυστότητα είναι επικρατέστερη σε κράμματα κυβικού εδροκεντρομένου συστήματος λόγω του ότι παράγεται Ήλιο.

### 3.1 Επιπτώσεις ακτινοβολίας στον εφελκυσμό

Οι επιπτώσεις της ακτινοβολίας στην αντοχή των φεριτικών/μαρτενσιτικών μετάλλων, εξαρτάται από τη θερμοκρασία ακτινοβόλησης. Σε θερμοκρασία κάτω από 400-500°C (εξαρτάται το χάλυβα), η επαγόμενη ακτινοβολία προκαλεί αλλαγές στη μικροδομή που αυτή με τη σειρά της οδηγεί σε σκλήρυνση του πλέγματος. Όλη αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα i) την αύξηση του ορίου τάσης διαρροής και της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής, και ii) τη μείωση της μορφής και της συνολικής επιμήκυνσης (διάγραμμα 6). Η σπουδαιότητα της σκλήρυνσης (αύξηση αντοχής) μειώνεται με αυξανόμενη θερμοκρασία μέχρι αυτή να φτάσει τους 400-500°C όπου η σκλήρυνση τότε θα εξαφανιστεί.

Υπάρχουν περιορισμένα στοιχεία σχετικά με τη ζημία που προκαλεί η ραδιενέργεια στις μικροδομές κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης νετρονίων στους 400°C [7.8]. Κάτω από περίπου 0,35 $T_m$ , όπου  $T_m$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία τήξης του χάλυβα ( $T_m=1800K$ ), η σκλήρυνση προκαλείται από μικρούς διάμεσους και κενούς βρόχους (κενά) οι οποίοι δημιουργούνται από την ακτινοβόληση. Μεταξύ 0,35 έως 0,4  $T_m$ , η σκλήρυνση οφείλεται στους βρόχους καθώς και τη μετατοπισμένη δομή που αναπτύσσεται από αυτούς, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, μαζί με οποιαδήποτε επαγόμενη ή επιταχυνόμενη ακτινοβολία που προκύπτει από την καθίζηση. Σε θερμοκρασίες άνω των 0,4  $T_m$ , η διάχυση των βλαβών είναι τέτοια που η ακτινοβολία προκαλεί ισχυρές κατακρημνίσεις που εκτραχύνονται ραγδαία (οι κλασσικές θερμικές διεργασίες γίνονται ενισχυμένες μέσω ακτινοβολίας). Οι θερμοκρασίες στις οποίες συμβαίνουν αυτές οι διεργασίες ποικίλουν αναλόγως τη σύνθεση του χάλυβα (π.χ όπως αναφέρεται παρακάτω ο χάλυβας F17 συνεχίζει να παρουσιάζει σκλήρυνση έως και τους 500°C ενώ άλλοι χάλυβες όπως το τροποποιημένο 9Cr-1 Mo και το HT9 δεν παρουσιάζουν σκλήρυνση στους 450°C).

Διάγραμμα 6: τάσεων-παραμορφώσεων με δύο καμπύλες για φερριτικό χάλυβα σε μη-ακτινοβολημένη κατάσταση και έπειτα από ακτινοβόληση σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες όπου προκύπτει η σκλήρυνση.



Οι περισσότερες από τις διεργασίες διεξάγονται για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της ακτινοβολίας στην αντοχή χαλύβων που έχουν ακτινοβοληθεί σε ταχείς και πολλών φασμάτων αντιδραστήρες, με κάποιες άλλες μελέτες σε δοκιμαστικούς αντιδραστήρες όπου είναι εφικτή μόνο χαμηλή δόση ακτινοβολίας. Λίγες είναι οι μελέτες που έχουν γίνει σε μέταλλα ακτινοβολημένα σε πηγή νετρονίων 14 MeV αντιδραστήρες σύντηξης, σε μία προσπάθεια να προσδιοριστεί εάν υπάρχουν διαφορές στη βλάβη που προκαλείται από νετρόνια σύντηξης και σχάσης.

### 3.2 Σκλήρυνση από ακτινοβόληση με σχάση νετρονίων (Συμβατικά Cr-Mo και χάλυβες μειωμένης ενεργοποίησης)

---

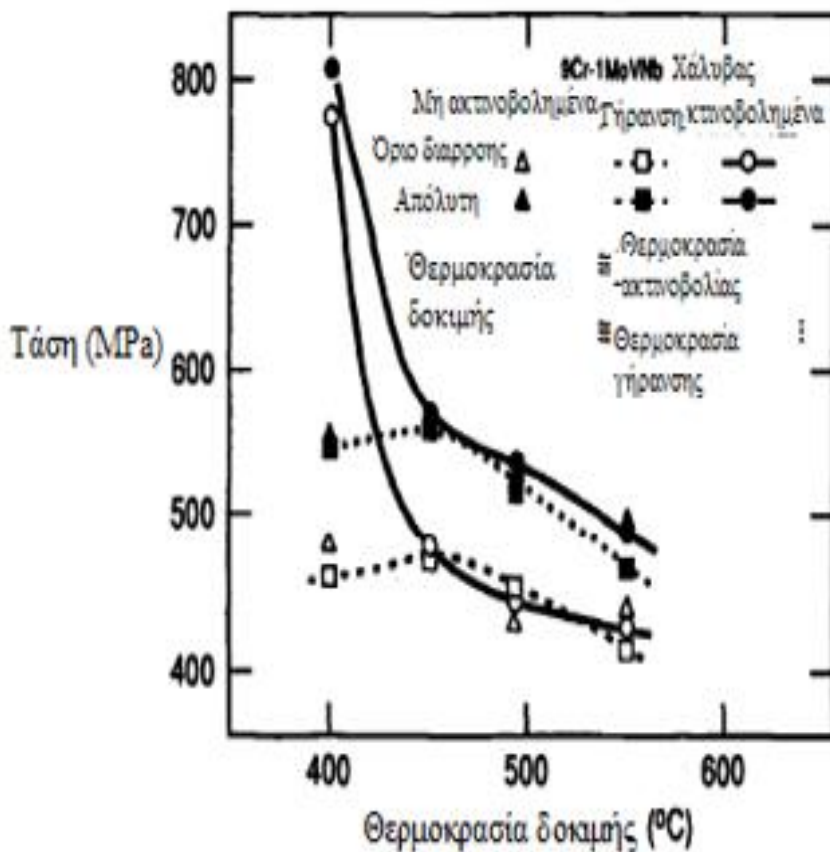
Η σκλήρυνση με ακτινοβόληση μπορεί να συμβεί σε χάλυβες που περιέχουν υψηλή ποσότητα χρωμίου ακόμα και σε χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας, όπως αποδεικνύεται από την ακτινοβόληση σε κανονική κατάσταση και μετά από ανόπτηση του MANET-II (ανοξειδωτος χάλυβας φερίτη-μαρτενσίτη), και κανονικής κατάστασης των χαλύβων CETA στον δοκιμαστικό αντιδραστήρα Saphir στην Ελβετία σε 0,042 dpa στους 250°C [9]. Δοκιμές σε θερμοκρασίες δωματίου, 250 και 400°C δείχνουν αύξηση στο όριο διαρροής και την μέγιστη εφελκυστική αντοχή. Στις δοκιμές που έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου, το όριο διαρροής είναι αυξημένο κατά 14% και 23% για το MANET-II και το CETA αντίστοιχα, με άλλα λόγια  $\Delta\sigma_y = 243$  MPa για το CETA και 93 MPa για το MANET-II, όπου  $\Delta\sigma_y$  είναι η μεταβολή του ορίου διαρροής. Οι χάλυβες ακτινοβολήθηκαν επίσης σε 0,13 dpa στους 405 °C. Η μετριάζουσα μικροδομή μαρτενσίτη σε κανονική κατάσταση και έπειτα από ανόπτηση του χάλυβα MANET-II έδειξε και πάλι σκλήρυνση.

Ωστόσο, στην περίπτωση του CETA που αποσβέστηκε (χάλυβας όπου έχει επιτύχει σκλήρυνση με εμβάπτηση σε λάδι ή νερό για να κρυώσει), το υλικό μαλάκωνε διότι ήταν εκτεθημένο για 1700 ώρες όπου παρέχεται χρόνος στην υψηλότερη θερμοκρασία να διαχύσει με ενισχυμένη ακτινοβολία για την επίσπευση στις διαδικασίες σκλήρυνσης σε μή ανοπτισμένους μαρτενσίτες [9]. Για παράδειγμα η επίδραση της ακτινοβόλησης των ταχέων αντιδραστήρων σε δόσεις κυρίως για μελέτες ακτινοβόλησης σε πυρηνικές εφαρμογές, τις ιδιότητες εφελκυσμού για τον χάλυβα 9Cr-1MoVNb μπορούμε να τις δούμε στο διάγραμμα 7 ενώ στο διάγραμμα 8 βλέπουμε για την ακτινοβολία στο EBR-II στους 390, 450, 500, και 550 °C σε περίπου 9 dpa με δοκιμή της έντασης σε θερμοκρασία ακτινοβολίας (τα δείγματα ακτινοβολήθηκαν στους 390 °C και δοκιμάστηκαν στους 400 °C) [10].

Επίσης φαίνονται στοιχεία για τους μη ακτινοβολημένους (σε κανονική κατάσταση και έπειτα από ανόπτηση) χάλυβες καθώς και για χάλυβες θερμικά γηρασμένους στις θερμοκρασίες ακτινοβόλησης για 5000 ώρες (χρόνος παραμονής τους μέσα στον αντιδραστήρα). Στους 390 °C η ακτινοβολία προκάλεσε αύξηση 0,2% τόσο στο όριο διαρροής όσο και στη μέγιστη εφελκυστική αντοχή (διάγραμμα 7). Στις θερμοκρασίες 450, 500, και 550 °C, υπήρξε μικρή διαφορά στην αντοχή μεταξύ των διαφόρων δειγμάτων, υποδεικνύοντας μικρή επίδραση της ακτινοβολίας ή της θερμικής γήρανσης. Η επίδραση της ακτινοβολίας στην ολκιμότητα αντανάκλουσε την επίδραση στην αντοχή (διάγραμμα 8). Οι αναλογικές (Hooke) και οι συνολικές επιμηκύνσεις των δειγμάτων που ακτινοβολήθηκαν στους 390 °C ήταν ελαφρώς μικρότερες από εκείνες των γηρασμένων και μη γηρασμένων ελέγχων (400 °C). Στις 3 υψηλότερες θερμοκρασίες δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση από ακτινοβολία.

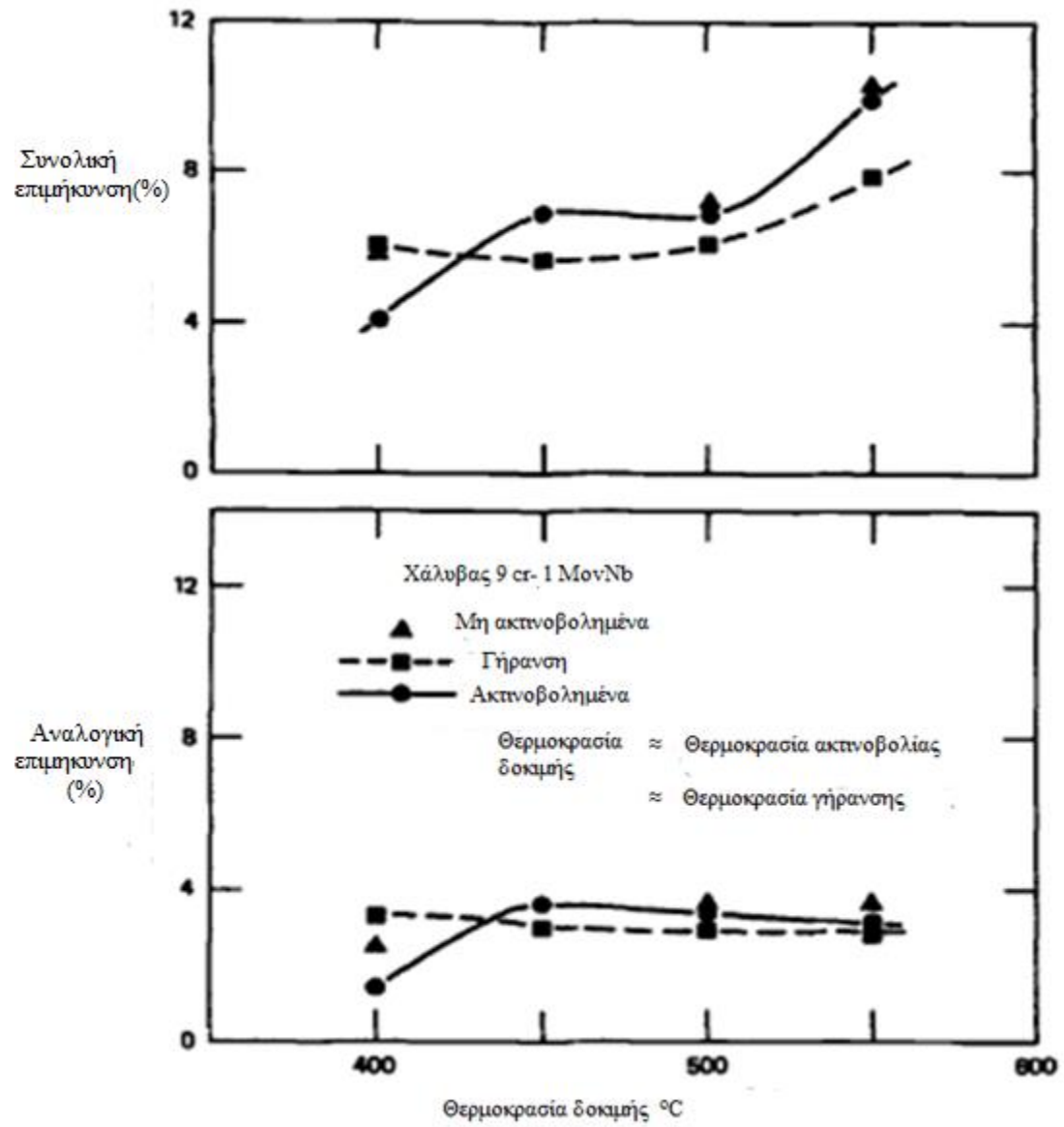
Δείγματα του χάλυβα 12Cr-1MoVW (Sandvik HT9) ακτινοβολήθηκαν στα 13 dpa σε EBR-II στο ίδιο πείραμα που ακτινοβολήθηκε και ο χάλυβας 9Cr-1MoVNb [11]. Παρατηρήθηκαν παρόμοιες επιπτώσεις ακτινοβολίας, δηλαδή προέκυψε σκλήρυνση στους 390°C και κατ'ουσίαν καμία αλλαγή στους 450, 500, και 550 °C. Τόσο ο χάλυβας 9Cr-1MoVNb όσο και ο 12Cr-1MoVW ακτινοβολήθηκαν σε EBR-II από 23 έως 25 dpa στις ίδιες θερμοκρασίες [12]. Στους 390°C υπήρξε μία μικρή μεταβολή σε σχέση με τους χάλυβες που ακτινοβολήθηκαν από 9 έως 13 dpa, μία ένδειξη ότι η σκλήρυνση κορέστηκε γύρω στα 10 dpa ή λιγότερο. Έπειτα από ακτινοβολήση στους 450, 500, και 550 °C, υπήρξε επίσης μία μικρή διαφοροποίηση στις εφελκυστικές ιδιότητες των χάλυβων που ακτινοβολήθηκαν στις δύο διαφορετικές δόσεις [11], παρόλο που υπήρξε μία ένδειξη επαύξησης της θερμικής γήρανσης που συμβαίνει στους 550 °C, μέσω ακτινοβολήσης.

*Διάγραμμα 7: ορίου διαρροής και μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό σε κανονική κατάσταση και μετά απο απόπτωση, σε θερμική γήρανση και ακτινοβολημένος χάλυβας 9Cr-1MoVNb. Η ακτινοβολήση έγινε στον αντιδραστήρα EBR-II σε 0.9 dpa [10].*





Διάγραμμα 8: Αναλογική και συνολική επιμήκυνση, του ομαλοποιημένου, ενισχυμένου θερμικά που έχει υποστεί θερμική γήρανση και ακτινοβόληση χάλυβα 9 cr-1 ΜονNb . Η ακτινοβόληση ήταν σε EBR-II με 0.9 dpa.



### 3.3 Ενδυναμωμένοι μέσω διασποράς οξειδίων χάλυβες

---

Μία λεπτομερής έρευνα για τη μικροδομή και τις εφελκυστικές ιδιότητες δημοσιεύτηκε στον χάλυβα DT2203Y05 (Fe-13Cr- 1.5Mo-2Ti-0.45Y-0.3O). Ο χάλυβας ODS (που έχει υποστεί ενδυνάμωση μέσω διασποράς οξειδίων) ακτινοβολήθηκε ως επένδυση ράβδου καυσίμου στον PHENIX στα 81 dpa από τους 400 μέχρι τους 580°C [13]. Εκεί παρατηρήθηκε ευθραυστότητα. Κατά τη διάρκεια της κοπής του σωλήνα για να λειφθούν δείγματα για εφελκυσμό, ένα κομμάτι του σωλήνα έσπασε. Επίσης παρατηρήθηκαν ρωγμές πάνω στα επενδυμένα τμήματα του σωλήνα και λόγω αυτών των ρωγμών [13], περίπου το 50% των εφελκυστικών δειγμάτων έσπασαν κατά την τοποθέτησή τους στη μηχανή εφελκυσμού στις θερμές κυψέλες (θωρακισμένοι θάλαμοι συγκράτησης πυρηνικής ακτινοβολίας. Δοκιμές στις τάσεις σε θερμοκρασία όπου έγινε ακτινοβόληση έδειξαν μία αύξηση στο όριο διαρροής και στη μέγιστη εφελκυστική αντοχή, με την αύξηση αυτή να είναι μεγαλύτερη στη χαμηλότερη θερμοκρασία ακτινοβόλησης. Προέκυψε επίσης μία μεγάλη μείωση της ολκιμότητας μαζί με την αύξηση της αντοχής, χωρίς ουσιαστικά καμία παραμόρφωση (ομοιόμορφη και ίση συνολικά επιμήκυνση) για τα δείγματα που ακτινοβολήθηκαν από 30 έως 81 dpa. Οι επιμηκύνσεις ήταν λιγότερο από 1% και χαμηλές μέχρι 0,2% στην μέγιστη δόση. Μόνο στις υψηλότερες θερμοκρασίες και στις χαμηλότερες δόσεις η ολκιμότητα ξεπέρασε το 1% [13].

### 3.4 Σκλήρυνση μέσω ακτινοβόλησης με 14MeV νετρόνια

---

Επειδή τα νετρόνια σύντηξης έχουν υψηλότερη ενέργεια από τα νετρόνια σχάσης, είναι ενδιαφέρον να προσδιοριστεί το κατά πόσο υπάρχει διαφορά στην σκλήρυνση που προκαλείται από τις διαφορετικές ενέργειες. Όταν η πηγή νετρονίων RTNS-II (Rotating Target Neutron Source) 14 MeV ήταν διαθέσιμη, διεξάχθηκαν δοκιμές με αυτό το αντικείμενο [14,15]. Σίδηρος υψηλής καθαρότητας ακτινοβολήθηκε στο RTNS-II στους 75°C στα  $9.8 \times 10^{20}$  έως  $2.7 \times 10^{22}$   $\text{nm}^{-2}$  (<1dpa) και τα αποτελέσματα ήρθαν σε σύγκριση με το ίδιο υλικό ακτινοβολημένο σε  $3.6 \times 10^{22}$   $\text{n m}^{-2}$  σε έναν δοκιμαστικό αντιδραστήρα πανεπιστημίου [14]. Υπήρχε μικρή διαφορά στο όριο διαρροής του χάλυβα που ακτινοβολήθηκε στο RTNS-II και στον αντιδραστήρα σχάσης.

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από μία προηγούμενη αδημοσίευτη μελέτη, όπου σίδηρος με υψηλότερο περιεχόμενο σε διάμεσες πλεγματικές θέσεις ακτινοβολήθηκε, τα τελευταία αποτελέσματα έδειξαν περισσότερη σκλήρυνση. Υπήρχαν επίσης διαφορές στη σκλήρυνση με την αύξηση της δόσης, οι οποίες αποδόθηκαν στην αλληλεπίδραση των σημειακών ατελειών με τις διάμεσες προσμείξεις του πλέγματος. Ο χάλυβας με το υψηλότερο διάμεσο περιεχόμενο έδειξε σταθερότητα στην αντοχή

με αύξηση της δόσης, κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε στον σίδηρο υψηλής καθαρότητας.

Ο Kohyama [15] ακτινοβόλησε δίσκους TEM (Transmission Electron Microscopy-Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο) από τέσσερις χάλυβες 9Cr-1-2MoVNb και έναν χάλυβα 11.5Cr-1MoV σε  $5 \times 10^{22} \text{ n m}^{-2}$  ( $< 1 \text{ dpa}$ ) στο RTNS-II στους 200°C και 400°C. Μια μικρή δοκιμή έδειξε ότι σε αντίθεση με τον σίδηρο υψηλής καθαρότητας, οι χάλυβες έδειξαν να μαλακώνουν, αν και δύο από τους χάλυβες άρχισαν να σκληραίνουν μετά από  $5 \times 10^{22} \text{ nm}^{-2}$ . Η μαλάκωση αποδόθηκε στο “σάρωμα των ενδιάμεσων προσμίξεων από τις μετατοπίσεις με την παραγωγή νέων μετατοπίσεων αλλά και το σάρωμα των συμπλεγμάτων των ενδιάμεσων προσμίξεων και των ελευθέρων ενδιάμεσων προσμίξεων στη μήτρα”. Αυτά τα αποτελέσματα από το RTNS-II είναι ενδιαφέροντα λόγω της χρήσης της πηγής 14 MeV νετρονίων (την μέγιστη ενέργεια νετρονίων σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης). Ωστόσο, λόγω των χαμηλών δόσεων στο RTNS-II, τα αποτελέσματα είναι μάλλον μικρής σημασίας για τις υψηλές δόσεις σε έναν αντιδραστήρα λειτουργίας σύντηξης.

Τα αποτελέσματα της σκλήρυνσης και του μαλακώματος που σημειώθηκαν σε αυτές τις πολύ χαμηλές δόσεις, πιθανώς θα αυξηθούν αν η σκλήρυνση γίνει με δόσεις 1 dpa και πάνω. Οι μελέτες για την βλάβη από ακτινοβόληση στις υψηλότερες δόσεις καθώς επίσης και οι μελέτες για ακτινοβόληση από αντιδραστήρα σχάσης είναι απαραίτητες, δεδομένου του ότι ουσιαστικά είναι οι μόνες διαθέσιμες πηγές νετρονίων. Μία από τις συνέπειες της υψηλής ενέργειας νετρονίων σε ένα φάσμα νετρονίων σύντηξης, είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων Ηλίου από (n,a) αντιδράσεις. Λόγω της χαμηλής ροής νετρονίων του RTNS-II, δεν υπάρχουν πληροφορίες για τις συνέπειες του Ηλίου που παράγεται από 14 MeV νετρόνια. Μέχρι πηγή νετρονίων 14 MeV με επαρκή ροή και όγκο ακτινοβολίας να γίνει διαθέσιμη, αυτές οι πληροφορίες θα προέρχονται από μελέτες, χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις ακτινοβόλησης.

### 3.5 Σκλήρυνση μέσω ακτινοβόλησης - Επιδράσεις από το Ήλιο

---

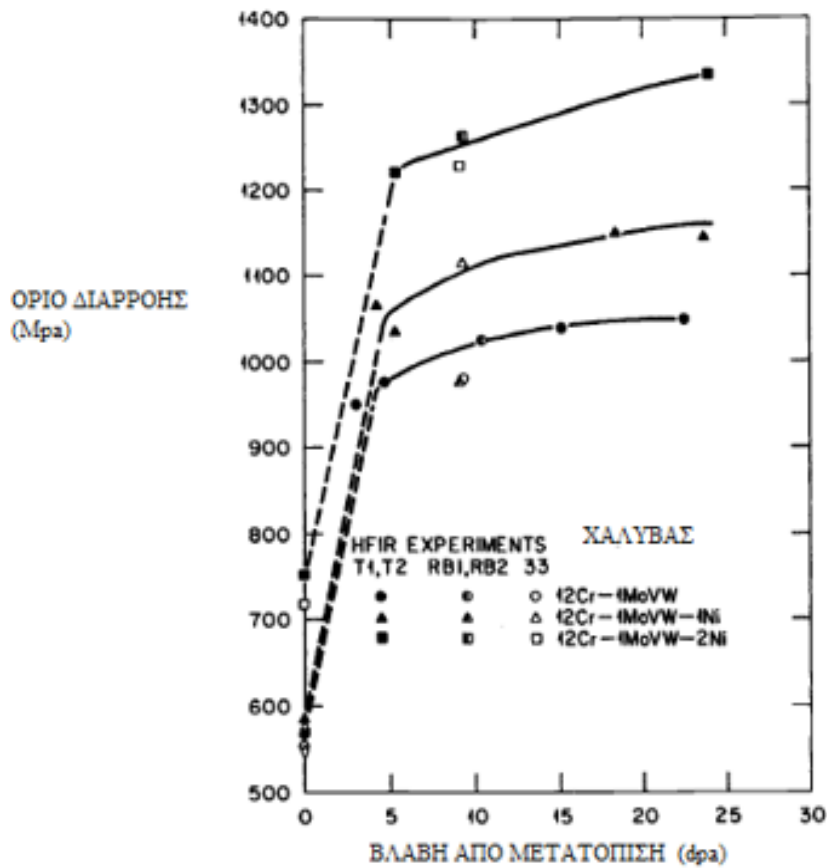
Οι μηχανισμοί με τους οποίους μεταστοιχειώνεται το ήλιο και μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες των ακτινοβολημένων υλικών περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση του ηλίου με τα ανώμαλα σημεία του πλέγματος [18-20]. Ο Mansur L.K και ο Grossbeck M.L [18], αναγνώρισαν κάποιες οντότητες που προκαλούν ήλιο-πλεγματικά κενά, ήλιο-ενδοπλεγματικούς σχηματισμούς. Παρατήρησαν επίσης ότι το ήλιο σταθεροποιείται στις οριακές κοιλότητες του πλέγματος, υποβοηθάει τους ενδοπλεγματικούς βρόχους και ότι σταθεροποιείται στα όρια των κόκκων. Εκτός από το γεγονός ότι το ήλιο σταθεροποιείται στα όρια των κόκκων, τα προηγούμενα δύο συμπεράσματα θεωρήθηκε ότι μπορούν να προκαλέσουν σκλήρυνση.

Το ήλιο που υποβοηθάει τους ενδοπλεγματικούς βρόχους αποφασίστηκε ότι είναι σημαντικό στις χαμηλές δόσεις [18]. Το ήλιο σταθεροποιεί αποτελεσματικά τον σχηματισμό πλεγματικών κενών, το οποίο σημαίνει ότι λιγότερες κενές θέσεις είναι διαθέσιμες για επανασύνθεση με τα ενδοπλεγματικά κενά (το ήλιο κρατάει τις κενές θέσεις και μειώνει τον επανασχηματισμό ενδοπλεγματικών κενών). Οι ενδοπλεγματικοί σχηματισμοί μπορούν να αναπτυχθούν σε βρόχους διαταραχών και να αυξήσουν την αντοχή τους [20]. Επιπλέον, το ήλιο σταθεροποιεί τους σχηματισμούς σε υψηλότερη θερμοκρασία, επεκτείνοντας έτσι το εύρος θερμοκρασίας σκλήρυνσης. Η μεταφορά του ηλίου στα όρια των κόκκων κατά την ακτινοβόληση σε μορφή φυσαλίδων μπορεί να οδηγήσει σε περικρυσταλλική θραύση και επομένως ευθραυστότητα. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να επιδεινωθεί από την σκλήρυνση εντός των εσωτερικών χώρων των κόκκων και να σχηματίσει μία παραμεθώρια ζώνη στα όρια των κόκκων που έχουν απογυμνωθεί από σχηματισμούς ελλατωμάτων [18-19].

Αρκετές προσπάθειες έχουν γίνει για να εξεταστεί η επίδραση του ηλίου κατά την σκλήρυνση χρησιμοποιώντας την τεχνική πρόσθεσης νικελίου, για να παράξει τον ταυτόχρονο σχηματισμό των βλαβών από μετατοπίσεις και του ηλίου [16,17,21-24]. Ο χάλυβας 9Cr-1MoVNb, ο προηγούμενος χάλυβας με 2% νικέλιο (9Cr-1MoVNb-2Ni), ο χάλυβας 12Cr-1MoVW, επίσης ο ίδιος με 1% νικέλιο (12Cr-1MoVW-1Ni) και με 2% νικέλιο (12Cr-1MoVW-2Ni), ακτινοβολήθηκαν στον HFIR [21-23] (High Flux Isotope Reactor-Αντιδραστήρας παραγωγής υψηλής ροής ισότοπων) και στον EBR-II [14] (Experimental Breeder Reactor). Ο πρότυπος χάλυβας 9Cr-1MoVNb περιέχει 0.1% νικέλιο και ο πρότυπος χάλυβας 12Cr-1MoVW 0.5% νικέλιο. Ο στόχος αυτών των πειραμάτων ήταν να προσδιοριστεί η επίδραση του ηλίου συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τους χάλυβες με διαφορετικές περιεκτικότητες σε νικέλιο ακτινοβολημένους σε HFIR και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με εκείνα του EBR-II. Οι ενισχυμένοι χάλυβες με νικέλιο που ακτινοβολήθηκαν σε HFIR σε 50 °C (θερμοκρασία ψύξης για HFIR), με μια δόση 25 dpa και οι συγκεντρώσεις ηλίου ήταν πάνω από 327 appm (atomic parts per million) [22,23,27]. Οι δοκιμές τάσεων διεξάχθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου.

Τα αποτελέσματα για τους χάλυβες 12Cr-1MoVW, 12Cr-1MoVW-1Ni και 12Cr-1MoVW-2Ni έδειξαν ότι το όριο διαρροής αυξάνεται με την αύξηση των βλαβών από μετατοπίσεις των ατόμων του πλέγματος (διάγραμμα 9) [27]. Με βάση το παρόμοιο όριο διαρροής για τους χάλυβες 12Cr-1MoVW και 12Cr-1MoVW-1N σε μη ακτινοβολημένη κατάσταση, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπήρχε επίδραση του ηλίου στην σκλήρυνση. Εάν ληφθεί υπ' όψιν η διαφορά των χάλυβων με 1% και 2% σε μη ακτινοβολημένες ιδιότητες, παρατηρούμε ότι δεν φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη σκλήρυνση για τον χάλυβα που περιέχει με 2% νικέλιο σε σχέση με τον χάλυβα με 1% νικέλιο.

Διάγραμμα 9: Το 0,2% του ορίου διαρροής των χάλυβων 12Cr-1MoVW, 12Cr-1MoVW-1Ni και 12Cr-1MoVW-2Ni ως συνάρτηση της δόσης για ακτινοβολία σε 50 °C στο HFIR [20].



Μία από τις δυσκολίες σε αυτές τις δοκιμές περιλαμβάνει τις αρχικές καταστάσεις των χάλυβων. Αφού το νικέλιο χαμηλώνει τη θερμοκρασία  $A_{c1}$ , οι χάλυβες με περιεκτικότητα 2% Ni (σε νικέλιο) έπρεπε να απαλλαγθούν από τις βλάβες σε μία χαμηλότερη θερμοκρασία (700°C) από τους συμβατικούς χάλυβες και τον χάλυβα 12Cr-1MoVW Ni (780°C). Η προσπάθεια να αυξηθεί ο χρόνος σε μια θερμοκρασία για να μετριαστούν σε παρόμοιες αντοχές δεν ήταν επιτυχής, και οι διάφορες αντοχές στη μη ακτινοβολημένη κατάσταση προκάλεσε δυσκολία στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων [17]. Περαιτέρω αβεβαιότητας περιλαμβάνει το γεγονός ότι τα αποτελέσματα είναι από 3 διαφορετικές κάψουλες ακτινοβολίας και 2 τύπους δειγμάτων (δειγμάτα υπό μορφή ράβδου και φύλλου) με κάπως διαφορετικές ιδιότητες στη μη ακτινοβολημένη κατάσταση [21].

Μεγαλύτερη αβεβαιότητα σχετικά με την επίδραση του ηλίου γι αυτές τις ακτινοβολίες χαμηλής θερμοκρασίας φαίνεται από τα αποτελέσματα σε ένα μειωμένης ενεργοποίησης 9Cr-2W χάλυβα με 1% Ni και χωρίς 1% Ni ακτινοβολημένο στον αντιδραστήρα JMTR στα 0,15 dpa στους 170 και στους 220°C [25]. Μετά από την ακτινοβόληση στους 170°C, παρατηρήθηκε μία αύξηση στο όριο διαρροής σε θερμοκρασία δωματίου για το χάλυβα που είχε νικέλιο μέχρι τα 350 MPa, συγκριτικά με την αύξηση μέχρι τα 120 MPa που παρατηρήθηκε για το χάλυβα που δεν περιείχε νικέλιο. Δεν παρατηρήθηκε διαφορά στην αντοχή για τους χάλυβες με νικέλιο και αυτούς χωρίς νικέλιο που ακτινοβολήθηκαν στους 220 °C. Πειράματα ανόπτησης έπειτα από ακτινοβόληση έδειξαν ότι η ανώμαλη σκλήρυνση του χάλυβα περιεκτικότητας νικελίου άρχισε να αποκαθίσταται στους 190 °C και εξαφανιζόταν έπειτα από ανόπτηση στους 250 °C [25].

Επιπλέον, παρόλο που υπήρχε μία ένδειξη να επιδρά το ήλιο στην εφελκυστική ιδιότητα, για χαμηλής θερμοκρασίας ακτινοβολίες, του ενισχυμένου με νικέλιο HT9 και του τροποποιημένου 9Cr-1Mo στον αντιδραστήρα HFIR [16,17,21], σκλήρυνση του τύπου που παρατηρήθηκε κάτω από τους 250 °C στο χάλυβα περιεκτικότητας 1% σε νικέλιο μπορεί να έπαιξε ρόλο [25]. Με προσμίξεις ή όχι εφελκυστικά ραβδοειδή δοκίμια 9Cr-1MoVNb, 9Cr-1MoVNb-2Ni, 12Cr-1MoVW, 12Cr-1MoVW-1Ni και 12Cr-1MoVW-2Ni, ακτινοβολήθηκαν στον αντιδραστήρα HFIR στους 300, 400, και 500°C (πάνω από τους 220 °C όπου δεν παρατηρήθηκε καμία σκλήρυνση στο χάλυβα περιεκτικότητας 1% σε νικέλιο) μέχρι περίπου 11 dpa και μέχρι 103 appm He [22]. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με δείγματα ακτινοβολημένα στον αντιδραστήρα EBR-II στους 390,450, 500, και 550 °C μέχρι περίπου 16 dpa και λίγο ήλιο [23]. Καμία επίδραση δεν εμφανίστηκε λόγω ηλίου στη σκλήρυνση για ακτινοβόληση στους 500°C (δεν παρατηρήθηκε σκλήρυνση) στον αντιδραστήρα HFIR, παρόμοια με τα αποτελέσματα πάνω από 400 °C για γρήγορους αντιδραστήρες όπου παράχθηκε ελάχιστο Ήλιο [10].

Λόγω των πειραματικών αβεβαιοτήτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα αποτελέσματα από τα ενισχυμένα με νικέλιο δοκίμια ήταν ασαφή όσον αφορά την επίπτωση του ηλίου στην εφελκυστική συμπεριφορά στους 300 και τους 400 °C, όπου παρατηρήθηκε η σκλήρυνση [22,23]. Κάθε συνεισφορά ηλίου από αυτές τις δοκιμές, αν υπάρχει, αποτελεί μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικής σκλήρυνσης στους 300 και τους 400 °C και διαβρέχεται με δόση. Δεν υπάρχει καμία ένδειξη αλλαγής στον τρόπο θραύσης για τα δείγματα με συγκεντρώσεις υψηλές σε ήλιο. Παρόμοια συμπεράσματα υπήρξαν όταν οι ίδιοι χάλυβες 9% και 12% με προσθήκες νικελίου,

ακτινοβολήθηκαν στον αντιδραστήρα HFIR μέχρι τα 72 dpa στους 400 και στους 600 °C [24]. Η αντοχή όλων των χαλύβων αυξήθηκε έπειτα από ακτινοβολία στους 400 °C, αλλά υπήρχε μία μικρή διαφορά στην αντοχή των χαλύβων με νικέλιο και αυτών χωρίς . Στους 600 °C υπήρχε απώλεια στην αντοχή, η οποία ήταν μεγαλύτερη από την απώλεια που παρατηρήθηκε σε χάλυβες θερμικά γηρασμένους 27000h στους 600 °C [24].

Ο Gelles [26], χρησιμοποίησε τα τριμερή κράμματα Fe-12Cr-1.5Ni, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν επίσης για τη μελέτη της διόγκωσης (swelling) [26], για να μελετηθούν οι επιπτώσεις της ενδυνάμωσης μέσω των δοκιμών διάτμησης-διάτρησης (shear-punch tests) σε ακτινοβολημένους και μη ακτινοβολημένους δίσκους TEM (Transmission Electron Microscopy-Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο). Οι δοκιμές διάτμησης-διάτρησης χρησιμοποιήθηκαν στα κράμματα Fe-12Cr-1.5Ni με  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ , και φυσικό νικέλιο ακτινοβολημένο περίπου στα 7dpa στον αντιδραστήρα HFIR στους 300, 400, 500 και 600 °C. Περίπου 45 appm He (ηλίου) παράχθηκε από το φυσικό νικέλιο, 80 appm He από το  $^{59}\text{Ni}$  και καθόλου ήλιο από το  $^{60}\text{Ni}$ .

Ακτινοβολήθηκε επίσης ένα κράμμα F-12Cr χωρίς καθόλου νικέλιο [26]. Δεν παρατηρήθηκε επίδραση ηλίου στη διατμητική τάση και τη μέγιστη διατμητική αντοχή, αλλά υπήρξε μία αύξηση στην αντοχή λόγω της ακτινοβόλησης η οποία μειώθηκε με την αυξανόμενη θερμοκρασία [26]. Σε μη ακτινοβολημένη κατάσταση, εμφανίστηκε μία ενδυνάμωση λόγω του νικελίου. Αυτή η ενίσχυση της επίδρασης αποδόθηκε στα άγνωστα ιζήματα που παρατηρήθηκαν [27]. Μπορεί να σημειωθεί επίσης το γεγονός ότι οι μικροδομές αυτών των κραμμάτων, οι οποίες περιείχαν 0,004% C, ήταν μαρτενσιτικά [26]. Οι χάλυβες επανέκαμψαν σε 1 ώρα στους 1040°C και μετριάσθηκαν σε 1 ώρα στους 760°C. Το νικέλιο ελατώνει τη θερμοκρασία  $A_{c1}$ , και για ένα χάλυβα 12Cr-1MoVW με 2% Ni, η θερμοκρασία  $A_{c1}$  είναι κάτω από 760 °C (κοντά στους 700 °C ) [17]. Εάν η  $A_{c1}$  για ένα κράμμα 1.5Ni είναι κάτω από 760 °C, τότε κάποιο μέρος της ή ολόκληρη η σκλήρυνση σε μη ακτινοβολημένη κατάσταση θα μπορούσε να είναι λόγω του μη μετριάσμένου μαρτενσίτη που παράχθηκε όταν τα δοκίμια ψύχθηκαν στη θερμοκρασία επαναφοράς.

Συνοψίζοντας, έχει γίνει προσπάθεια σε αυτή την ερευνητική εργασία για το συσχετισμό των μικροσκοπικών πτυχών των επιπτώσεων της ακτινοβολίας στα πυρηνικά δομικά υλικά με τις μακροσκοπικές επιπτώσεις και τις πρακτικές συνέπειες της μηχανικής.

Καθώς τα δομικά ελαττώματα και οι μικροδομικές αλλαγές που οφείλονται στην ακτινοβολία των νετρονίων ποικίλουν ανάλογα με τη θερμοκρασία, τη δόση, το ενεργειακό φάσμα και τη ροή των νετρονίων, διάφορες επιπτώσεις και φαινόμενα γίνονται σημαντικά για διαφορετικά συστήματα αντιδραστήρων. Από μία βασική άποψη οι επιπτώσεις αυτές έχουν ανοίξει νέους δρόμους στους επιστήμονες που ασχολούνται με τα υλικά καθώς προκύπτουν ελαττώματα στη δομή των υλικών και μικροδομικές αλλαγές τις οποίες δεν συναντούν συνήθως σε κράμματα κάτω από τις συνθήκες ισορροπίας. Αυτό έχει οδηγήσει στην ονομασία του πεδίου ως "επιστήμη των υλικών μέσω ακτινοβολήσης (irradiation-enhanced materials science)". Το ενδιαφέρον του θέματος αυτού συνοψίζεται με τον καλύτερο τρόπο από τα λόγια του Sir Alan Cottrell από την ενακτήρια ομιλία του στη 10<sup>η</sup> επετειακή διάσκεψη της Βρετανικής Κοινότητας Πυρηνικής Ενέργειας (British Nuclear Energy Society). Σύμφωνα με τον ίδιο ανά τον κόσμο πολλοί είναι οι επιστήμονες οι οποίοι βρίσκονται στο δίλλημα μεταξύ βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας και εκφράζει το θαυμασμό του ότι στο συγκεκριμένο θέμα υπάρχουν και τα δύο, εξηγώντας ότι από τη μία πλευρά υπάρχουν όλες αυτές οι μετατοπίσεις των σωματιδίων, οι κενές θέσεις που δημιουργούνται μέσα στο υλικό από την επίδραση της ακτινοβολίας, οι αλλαγές στο κρυσταλλικό πλέγμα και στα όρια των κόκκων και από την άλλη οι επιδόσεις των υλικών που είναι μεγάλης σημασίας για την πρακτική μηχανική των αντιδραστήρων και πρέπει να γίνουν κατανοητές έτσι ώστε να κατασκευαστούν καλύτεροι αντιδραστήρες.

Κλείνοντας, μια πρακτική εφαρμογή που θα μπορούσε να προκύψει από τα πλαίσια της έρευνας αυτής σε συνδυασμό με τις έρευνες που γίνονται καθημερινά για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι προς την κατεύθυνση παραγωγής αιολικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες. Το βασικό τμήμα μίας ανεμογεννήτριας είναι η πτέρυγα η οποία πρέπει να διασχίζει τον αέρα σε πολύ μεγάλες ταχύτητες με τη μικρότερη τριβή. Για το λόγο αυτό προτείνουμε τα άκρα της πτέρυγας της ανεμογεννήτριας να είναι υπό μορφή μεταλλικών λεπίδων μεγάλης αντοχής. Με το σκοπό αυτό το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ σε συνεννόηση με μία εταιρία που κατασκευάζει ανεμογεννήτριες θα μπορούσε να προετοιμάσει ένα ερευνητικό πρόγραμμα. Το πρόγραμμα αυτό θα έχει σαν βασικό σκοπό την κάλυψη των πλαστικών άκρων της πτέρυγας της ανεμογεννήτριας με πολύ λεπτό χάλυβα μεγάλης αντοχής κατόπιν έκθεσης του σε υψηλή δόση ραδιενέργειας κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.



Στο προτεινόμενο ερευνητικό πρόγραμμα που αναφέραμε, η σκλήρυνση των επιμεταλλωμένων με χάλυβα άκρων της πτέρυγας της ανεμογεννήτριας είναι επιθυμητή για καλύτερη απόδοση και διάρκεια (radiation improvement).

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον υπεύθυνο καθηγητή μας Δρ. Ελευθέριο Αδαμίδα για την πολύτιμη βοήθειά του, τη μετάδοση των γνώσεων και της εμπειρίας του καθώς και για την απαραίτητη προσοχή και ενδιαφέρον που έδειξε για την εκπόνηση της ερευνητικής εργασίας. Θα θέλαμε επίσης να ευχαριστήσουμε τον κύριο Αποστολόπουλο Γεώργιο του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ" για τις πληροφορίες, τις πηγές και την προσωπική του γνώση και εμπειρία σχετικά με το αντικείμενο της ραδιενέργειας.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] American Society for Testing and Materials 2000 19<sup>th</sup> Int. Symp. on Radiation Effects in Materials. ASTM Special Technical Publication STP1366. All the proceedings of this biennial series of symposia have been published as ASTM special technical publications and are of relevance. Full information is available at <http://www.astm.org/search/iatoc>
- [2] Norgett M. J. Robinson MT, Torrens I M 1975 A proposed method for calculating displacement rates. Nucl. Eng. Des.33,50±4
- [3] Linga Murthy K 1996b Role and significance of source hardening in radiation embrittlement of iron and ferritic steels. J . Nuclear Mater. 270, 115±28
- [4] Rodriguez P, Krishnan R, Sundaram CV 1984 Radiation effects in nuclear reactor materials-correlation with structure. Bull. Mater. Sci. 6, 339±67
- [5] Little E. A 1976 Neutron-irradiation hardening in irons and ferritic steels. Int . Rev. 204,25±60
- [6] Sheely WF (ed.) 1967 Radiation Effects. Gordon and Breach, New York
- [7] V. S. Agueev, V. N. Bykov, A. M. Dvoryashin, V. N. Golovanov, E. A. Medvedeva, V. V. Romaneev, V. K. Shamardin and A. N. Vorobiev in: Effects of radiation on materials: 14<sup>th</sup> International Symposium ASTM STP 1046, Vol.1 Eds., N.H. Packan, R.E. Stoller and A.S Kumar (American Society for testing and materials Philadelphia, 1989) 98.
- [8] P. J. Maziasz, R. L. Klueh and J. M. Vitek, J. Nucl. Mater. 141-143 (1986) 929.
- [9] I. Belianov and P. Marmy, J. Nucl. Mater.258-263 (1998) 1259.
- [10] R. L. Klueh and J. M. Vitek, J. Nucl. Mater .132 (1985) 27.
- [11] R. L. Klueh and J. M. Vitek, J. Nucl. Mater .137 (1985) 44.
- [12] R. L. Klueh and J. M. Vitek, J. Nucl. Mater. 182 (1991) 230.
- [13] P. Dubuisson, R. Schill, M.P. Hugon, I. Grislin, and J.L. Seran in: Effects of radiation materials 18<sup>th</sup> international symposium, ASTM STP 1325, Eds. R.K. Nanstad, M.L. Hamilton, F.A. Garner and A.S. Kumar (American society for testing and materials, West Conshohocken, PA, 1999) 882.
- [14] H. Matsui, K. Abe, S. Hirano, O. Yoshinari and M. Koiwa, J. Nucl. Mater: 133 & 134 (1985) 615.
- [15] A. Kohyama, K. Asakura, Y. Kohno, K. Komamura, K. Suziki, M. Kiritani, T. Fujita and N. Igata, J. Nucl. Mater. 133 & 134 (1985) 628.

- [16] R.L. Klueh, J.M. Vitek, and M.L. Grossbeck , J. Nucl. Mater.103 & 104 (1981) 887.
- [17] R.L. Klueh, J.M. Vitek and M.L. Grossbeck in:Effects of radiation on materials: 11<sup>th</sup> conference ASTM STP, 782 Eds. H. R. Brager and J.S. Perrin (American Society for testing and materials Philadelphia 1982) 648.
- [18] L.K. Mansur and M.L. Grossbeck J. Nucl. Mater. 155 & 157 (1988) 130.
- [19] K. Farrell, P. J. Maziasz, E. H. Lee and L. K. Mansur, Radiation Effects 78 (1983) 277
- [20] K. Farrell, Radiation Effects 53 (1980) 175.
- [21] R. L. Klueh and J. M. Vitek, J. Nucl. Mater. 161 (1989) 13.
- [22] R. L. Klueh and J. M. Vitek, J. Nucl. Mater. 150 (1987) 272.
- [23] R.L. Klueh P.J. Maziasz and J. M. Vitek, J. Nucl. Mater. 151-143 (1986) 960.
- [24] R.L. Klueh and P.J. Maziasz, J. Nucl. Mater. 187 (1992) 43.
- [25] R. Kasada, A. Kimura, H. Matsui and M. Nartui, J. Nucl. Mater. 258-263 (1998) 1199.
- [26] D. S. Gelles, G. L. Hankin and M. L. Hamilton J. Nucl. Mater. 251 (1997) 188.
- [27] D. S. Gelles in: Effects of radiation on materials: 18<sup>th</sup> conference ASTM STP 1325 Eds. R. K. Nanstad, M. L. Hamilton, F. A. Garner and A. S. Kumar (American society for testing and materials, Philadelphia, 1999) 899.