

Ενότητα Ασφάλεια υδρογόνου, Κίνδυνοι, Πρότυπα και Κανονισμοί

Αποδεκτή επίδοση σε αυτή την ενότητα αποτελεί η ικανοποιητική επίτευξη των προτύπων που ορίζονται σε αυτό το μέρος των προδιαγραφών της ενότητας. Όλα τα τμήματα της δήλωσης προτύπων είναι υποχρεωτικά και δεν δύναται να τροποποιηθούν.

Περιεχόμενα

Ενότητα Ασφάλεια υδρογόνου, Κίνδυνοι, Πρότυπα και Κανονισμοί.....	1
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 1 Αναφορά στην ισχύουσα νομοθεσία για την υγεία και την ασφάλεια που καλύπτει τους εργοδότες και τους εργαζόμενους.....	3
Γενικές αρχές υγείας και ασφάλειας.....	3
Διαδικασίες υγείας και ασφαλείας.....	3
Εκτιμήσεις κινδύνου.....	4
Οδηγοί ασφαλούς πρακτικής εργασίας.....	4
Σήματα ασφαλείας και προειδοποίησης.....	5
Ευθύνη του εργοδότη.....	8
Διαδικασίες έκτακτης ανάγκης και διαχείρισης περιστατικών και οι απαιτήσεις τους.....	8
Ορολογία της αντίδρασης του υδρογόνου.....	10
Κίνδυνοι από το υδρογόνο.....	11
Φυσιολογικοί κίνδυνοι.....	12
Συνήθεις αιτίες ατυχημάτων και ανάφλεξης υδρογόνου.....	13
Τύποι ατυχημάτων και οι συνέπειές τους.....	16
Ορολογίες καύσης.....	19
Συμβατότητα υδρογόνου.....	20
Ευθραυστότητα υδρογόνου (HE).....	21
Διαδικασίες και σκοπός ασφαλούς αποθήκευσης - Γιατί είναι σημαντική η αποθήκευση υδρογόνου.....	23
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 2 Προετοιμασία για το χειρισμό αερίου υδρογόνου.....	28
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΥ.....	28
Χρήση εγγενών χαρακτηριστικών ασφαλείας.....	28
Ασφαλής εργασία με αέρια και ψυκτικά μέσα.....	30
Εργασία με εύφλεκτα ψυκτικά μέσα.....	32
Εργασία με εύφλεκτα ψυκτικά μέσα.....	33
Τεχνολογία ανίχνευσης αερίου υδρογόνου.....	36



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 3 Εκτέλεση άσκησης εκτίμησης κινδύνου σε περιβάλλον υδρογόνου.....	38
Τι είναι η αξιολόγηση κινδύνου;.....	38
Προσέγγιση 5 βημάτων για τον εντοπισμό των κινδύνων και την εκτίμηση των κινδύνων.....	39

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 1 Αναφορά στην ισχύουσα νομοθεσία για την υγεία και την ασφάλεια που καλύπτει τους εργοδότες και τους εργαζόμενους

Το περιεχόμενο αυτής της ενότητας έχει σχεδιαστεί με στόχο να επιτρέπει στους/τις εκπαιδευόμενους/ες να εργάζονται με ασφάλεια στο χώρο εργασίας υδρογόνου. Αυτό υποστηρίζεται από την απόκτηση γνώσεων από τους/τις εκπαιδευόμενους/ες όσον αφορά τη σχετική νομοθεσία, τους ρόλους, τις αρμοδιότητες και τις απαιτήσεις του κοινού δικαίου κατά την ερμηνεία της ισχύουσας νομοθεσίας. Οι εκπαιδευόμενοι/ες θα κληθούν επίσης να διενεργήσουν αξιολόγηση κινδύνου και να συμπληρώσουν έγγραφα pro-forma. Η μελέτη της νομοθεσίας θα πρέπει να περιλαμβάνει την επίγνωση του σκοπού και της εφαρμογής των κανονισμών για τη διαχείριση της υγείας και της ασφάλειας στην εργασία του 1999 (EE), καθώς και ειδικών κανονισμών, βιομηχανικών προτύπων, νομοθετικών απαιτήσεων, κωδίκων πρακτικής, συστάσεων και προδιαγραφών κατασκευαστών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων.

Γενικές αρχές υγείας και ασφάλειας

Υπάρχουν πολλοί γενικοί κίνδυνοι που μπορεί να προκύψουν κατά τη διαδικασία εξέτασης και δειγματοληψίας. Υπάρχουν επίσης ειδικοί κίνδυνοι που αφορούν ορισμένα εμπορεύματα. Πρέπει να ακολουθείτε προληπτική προσέγγιση για να προστατεύετε τη δική σας ασφάλεια και την ασφάλεια των ατόμων που εργάζονται μαζί σας ή για τα οποία είστε υπεύθυνοι. Περαιτέρω, πρέπει επίσης να διασφαλίσετε ότι δεν εκθέτετε τους γύρω σας σε μεγαλύτερους κινδύνους είτε μέσω της μόλυνσης των εμπορευμάτων είτε, εξαιτίας της δικής σας δράσης, αφήνοντας τα εμπορεύματα σε επικίνδυνη κατάσταση.

Διαδικασίες υγείας και ασφαλείας

Οι ορθές πρακτικές υγιεινής και ασφάλειας είναι ευθύνη όλων μας. Η εθνική νομοθεσία θα υπαγορεύσει τον τρόπο εφαρμογής των πολιτικών για την υγεία και την ασφάλεια που θα ακολουθήσετε. Ωστόσο, ως οδηγός, κάθε σύστημα θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- Μία δηλωμένη πολιτική σχετικά με την ατομική και εταιρική ευθύνη για την ασφάλεια.
- Ένα σύνολο εκτιμήσεων κινδύνου για τους χώρους και τις εργασίες που εκτελούνται σε αυτούς, προσδιορίζοντας τους κινδύνους και τα αντίμετρα.
- Οδηγούς ασφαλούς εργασιακής πρακτικής, παρέχοντας συγκεκριμένες συστάσεις σχετικά με τις ασφαλείς διαδικασίες για την ολοκλήρωση των εργασιών.
- Μία διαδικασία αναφοράς ατυχημάτων, επιτρέποντας την άντληση διδαγμάτων και την ανατροφοδότηση των εκτιμήσεων κινδύνου και των οδηγιών ασφαλούς πρακτικής εργασίας.



- Τακτικές αναθεωρήσεις, ώστε να διασφαλίζεται ότι οι εκτιμήσεις κινδύνων και οι οδηγίες ασφαλούς πρακτικής εργασίας είναι επικαιροποιημένοι (τουλάχιστον ετησίως - ή μετά από οποιαδήποτε αλλαγή/τροποποίηση που επηρεάζει την υγεία και την ασφάλεια).

Όταν εργάζεστε σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, είναι καλή πρακτική να εργάζεστε σε ομάδες τουλάχιστον δύο ατόμων. Μπορείτε επίσης να εφαρμόσετε ένα σύστημα "φίλων" όπου δύο υπάλληλοι είναι υπεύθυνοι ο ένας για την ασφάλεια του άλλου. Η βασική εκπαίδευση πρώτων βοηθειών που παρέχεται σε όλο το προσωπικό θα τους δώσει τη δυνατότητα να παρέχουν ταχεία βοήθεια σε οποιονδήποτε συνάδελφο ο οποίος αντιμετωπίζει δυσκολίες.

Εκτιμήσεις κινδύνου

Οι εκτιμήσεις κινδύνου μπορεί να καλύπτουν είτε μία τοποθεσία είτε μία διαδικασία και χρειάζεται να αναφέρονται σε όλους τους πιθανούς κινδύνους και τα αντίμετρα. Θα πρέπει να διενεργείτε αξιολογήσεις κινδύνου για κάθε θέση όπου πραγματοποιείται δειγματοληψία. Η εκτίμηση κινδύνου είναι μια διαδικασία διαχείρισης και ελέγχου της υγείας και της ασφάλειας με:

- τον εντοπισμό του κινδύνου,
- την αξιολόγηση του κινδύνου,
- την εισαγωγή προληπτικών και προστατευτικών μέτρων για τη μείωση ή την εξάλειψη του κινδύνου,
- την επανεξέταση των μέτρων ελέγχου προκειμένου να βεβαιωθείτε ότι εξακολουθούν να είναι κατάλληλα.

Αντίγραφα των εκτιμήσεων κινδύνου πρέπει να είναι διαθέσιμα σε οποιονδήποτε εισέρχεται ή εργάζεται στο χώρο και πρέπει να επανεξετάζονται ετησίως ή όταν επέρχεται οποιαδήποτε αλλαγή που επηρεάζει τη θέση ή τη διαδικασία.

Οι γενικές εκτιμήσεις κινδύνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για τοπικές εκτιμήσεις κινδύνων. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την εκτίμηση κινδύνου παρέχονται στο Αποτέλεσμα 3. Η εθνική σας διοίκηση μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικά έντυπα ή διαδικασίες, ωστόσο η αρχή παραμένει η ίδια.

Οδηγίες ασφαλούς πρακτικής εργασίας

Θα πρέπει να συμφωνήσετε σε τυποποιημένες πρακτικές ασφαλούς εργασίας με τους διευθυντές ή/και τους εμπειρογνώμονες υγείας και ασφάλειας για συγκεκριμένες τοποθεσίες και διαδικασίες, π.χ. εργασία σε ή πάνω σε:

- καταψύκτες

- κορυφή οδικών/ σιδηροδρομικών βυτιοφόρων ή άλλων εμπορευματοκιβωτίων φορτίου
- διακίνηση σιτηρών
- εγκαταστάσεις των εμπόρων (δηλ. σε άγνωστες τοποθεσίες)
- χώρους όπου λειτουργούν γερανοί και περονοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα
- τερματικούς σταθμούς εμπορευματοκιβωτίων
- τερματικούς σταθμούς roll-on/roll-off
- σιδηροδρομικούς τερματικούς σταθμούς.

Ασφαλείς πρακτικές εργασίας μπορεί να καλύπτουν πτυχές όπως:

- τον ατομικό προστατευτικό εξοπλισμό που πρέπει να χρησιμοποιείται
- ειδοποίηση του χειριστή
- διασφάλιση ότι ένας συνάδελφος ή χειριστής είναι πάντα παρών για να διασφαλίζει την ασφάλειά σας
- διαδικασίες πρόσβασης στον χώρο
- εξοπλισμό δειγματοληψίας
- διαδικασίες δειγματοληψίας.

Σήματα ασφαλείας και προειδοποίησης

Τα σήματα και οι ετικέτες παρέχονται για την προστασία της υγείας και της ασφάλειάς σας και των ατόμων που εργάζονται μαζί σας και γύρω σας. Πρέπει να τηρείτε τις πινακίδες ανά πάσα στιγμή και να λαμβάνετε κάθε προφύλαξη. Για την τυποποίηση των σημάτων ασφαλείας και των προειδοποιητικών πινακίδων έχουν εκδοθεί ευρωπαϊκές οδηγίες. Ωστόσο, οι υπάρχουσες πινακίδες ενδέχεται να μην ανταποκρίνονται στα νέα σχέδια. Εάν δεν είναι σαφές τι σημαίνει μια πινακίδα, θα πρέπει να ζητήσετε συμβουλές από τον υπεύθυνο για τη διασφάλιση της υγείας και την ασφάλεια, είτε πρόκειται για λιμάνι, αποβάθρα, αποθήκη, είτε για πλοίο ή αεροσκάφος.

Τα Ηνωμένα Έθνη έχουν εισαγάγει διεθνείς προειδοποιητικές πινακίδες κινδύνου για τη μεταφορά εμπορευμάτων και χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο. Η παρούσα ενότητα παρέχει επομένως μία επισκόπηση των τύπων των σημάτων και της γενικής τους σημασίας.

Σήματα απαγόρευσης

Ένα απαγορευτικό σήμα σημαίνει ότι η ενέργεια ή η δραστηριότητα που υποδεικνύεται απαγορεύεται. Είναι σημαντική η τήρηση των συγκεκριμένων πινακίδων. Ορισμένες δείχνουν μόνο ένα σύμβολο, ενώ άλλες έχουν από κάτω επεξηγηματικό κείμενο.



Απαγορεύεται η
διέλευση πεζών



Μη πόσιμο νερό



Απαγορεύεται το κάπνισμα

Η μη τήρηση αυτών των πινακίδων μπορεί να θέσει τον εαυτό σας και άλλους σε κίνδυνο τραυματισμού ή θανάτου.

Προειδοποιητικά σήματα

Οι προειδοποιητικές πινακίδες έχουν σκοπό να σας προειδοποιούν για πιθανούς κινδύνους. Ο κίνδυνος μπορεί να είναι περιοδικός ή μόνιμος. Η πινακίδα υπάρχει για να σας υπενθυμίζει τον πιθανό κίνδυνο. Πρέπει να λάβετε υπόψη σας τον κίνδυνο και να λάβετε τις απαραίτητες προφυλάξεις. Η πρώτη πινακίδα παραπάνω παρέχει μια γενική προειδοποίηση - μπορεί να προστεθεί κείμενο για να διευκρινιστεί ένας κίνδυνος που δεν καλύπτεται από τα αναγνωρισμένα σύμβολα, ή μπορεί να προειδοποιεί για μια σειρά άλλων πιθανών κινδύνων.

Υποχρεωτικές πινακίδες

Οι υποχρεωτικές πινακίδες υποδεικνύουν ένα συγκεκριμένο μέτρο ασφαλείας που πρέπει να λάβετε πριν εισέλθετε στον καθορισμένο χώρο ή πριν συνεχίσετε τις εργασίες σας. Η μη τήρηση αυτών των πινακίδων μπορεί να σας θέσει σε κίνδυνο άμεσου τραυματισμού ή/και μακροχρόνιων προβλημάτων υγείας. Εάν δεν υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός, δεν πρέπει να συνεχίσετε.

			
Υποχρεωτική προστασία των ματιών	Υποχρεωτική προστασία του κεφαλιού	Υποχρεωτική προστασία των αυτιών	Υποχρεωτική χρήση ενδυμασίας υψηλής ορατότητας

Σήματα ασφαλείας

Εκτός από τις απαγορευτικές, τις προειδοποιητικές και τις υποχρεωτικές πινακίδες, θα υπάρχει και μία ποικιλία πινακίδων ασφαλείας, όπως πινακίδες εξόδου κινδύνου σε περίπτωση πυρκαγιάς, πινακίδες πρώτων βοηθειών και πινακίδες εξοπλισμού πυρόσβεσης.

		
Πρώτες βοήθειες	Πλύση ματιών	Πυροσβεστήρας

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, το σύμβολο μπορεί να περιέχει κείμενο. Θα πρέπει να εξοικειωθείτε με τη θέση αυτών των πινακίδων πριν ξεκινήσετε τις εργασίες. Οι ασφαλείς έξοδοι κινδύνου και οι διαδικασίες θα πρέπει να περιλαμβάνονται στην εκτίμηση κινδύνου και στους οδηγούς ασφαλούς πρακτικής εργασίας.

Περισσότερες πληροφορίες για το θέμα αυτό μπορείτε να βρείτε στο διαδικτυακό τόπο της Ευropa στη διεύθυνση: <https://echa.europa.eu/-/updated-interactive-guide-on-safety-data-sheets-and-exposure-scenarios-available>.



Ευθύνη του εργοδότη

Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία για την υγεία και την ασφάλεια, οι εργοδότες είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση των κινδύνων για την υγεία και την ασφάλεια στις επιχειρήσεις τους. Τα παρακάτω παρέχουν ένα γενικό περίγραμμα του τρόπου με τον οποίο ο νόμος εφαρμόζεται στους εργοδότες. Μην ξεχνάτε ότι οι εργαζόμενοι και οι αυτοαπασχολούμενοι έχουν επίσης σημαντικές ευθύνες. Είναι καθήκον του εργοδότη να προστατεύει την υγεία, την ασφάλεια και την ευημερία των εργαζομένων του και άλλων ατόμων που ενδέχεται να επηρεάζονται από τις εργασιακές τους δραστηριότητες. Οι εργοδότες πρέπει να κάνουν ό,τι είναι εύλογα εφικτό για να διασφαλίσουν θέματα που αφορούν στην υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων τους. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να διασφαλίζουν ότι οι εργαζόμενοι προστατεύονται από τυχόν κινδύνους που προκύπτουν από τις εργασιακές τους δραστηριότητες.

- Εκτίμηση κινδύνων.

Οι εργοδότες έχουν υποχρεώσεις βάσει της νομοθεσίας για την υγεία και την ασφάλεια, να αξιολογούν τους κινδύνους στο χώρο εργασίας. Αυτό σημαίνει ότι εντοπίζουν τις εργασιακές δραστηριότητες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τραυματισμό ή ασθένεια και λαμβάνουν μέτρα για την εξάλειψη του κινδύνου ή, αν αυτό δεν είναι δυνατό, για τον έλεγχό του.

- Παροχή πληροφοριών σχετικά με τους κινδύνους.

Οι εργοδότες πρέπει να ενημερώνουν τους εργαζομένους για τους κινδύνους στο χώρο εργασίας τους και για τον τρόπο προστασίας τους, καθώς και να τους καθοδηγούν και να τους εκπαιδεύουν για την αντιμετώπιση των κινδύνων.

- Διαβούλευση με τους εργαζομένους για ανταλλαγή απόψεων.

Οι εργοδότες πρέπει να διαβουλεύονται με τους εργαζομένους για θέματα υγείας και ασφάλειας. Η διαβούλευση πρέπει να γίνεται είτε απευθείας είτε μέσω εκπροσώπου ασφάλειας, ο οποίος είτε εκλέγεται από το εργατικό δυναμικό, είτε διορίζεται από συνδικαλιστική οργάνωση.

- Παροχή πληροφοριών για την υγεία και την ασφάλεια.

Οι εργοδότες έχουν νομική υποχρέωση να αναρτούν την εγκεκριμένη αφίσα σε εμφανές σημείο σε κάθε χώρο εργασίας ή να παρέχουν σε κάθε εργαζόμενο, αντίγραφο του εγκεκριμένου φυλλαδίου.

- Αναφορά θεμάτων που αφορούν στην υγεία από τους εργαζομένους.

Διαδικασίες έκτακτης ανάγκης και διαχείρισης περιστατικών και οι απαιτήσεις τους

Το προσωπικό της εγκατάστασης που αναμένεται να αναλάβει επιθετική δράση σε περίπτωση απελευθέρωσης υδρογόνου πρέπει να είναι εκπαιδευμένο ώστε να ανταποκρίνεται κατάλληλα για την προστασία ανθρώπων και περιουσίας. Η εκπαίδευση θα πρέπει να βασίζεται στο συγκεκριμένο



σύστημα που εφαρμόζεται και θα πρέπει να συντονίζεται με οποιοδήποτε σχέδιο ή σχέδια αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης σε ολόκληρη την εγκατάσταση.

Ένα σχέδιο δράσης έκτακτης ανάγκης που περιγράφει τις διαδικασίες συμβάντος θα πρέπει να αποτελεί τη βάση για την εν λόγω εκπαίδευση. Το σχέδιο δράσης έκτακτης ανάγκης θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- Διαδικασίες εκκένωσης, περιγραφή των εξόδων και προσδιορισμό των χώρων συγκέντρωσης για το προσωπικό που δεν ανταποκρίνεται.
- Προσδιορισμό ενός συστήματος συναγερμού ή άλλων μέσων για την ειδοποίηση των εργαζομένων, όπως είναι για παράδειγμα το σύστημα δημόσιων ανακοινώσεων.
- Σύστημα συναγερμού (αποτελούμενο τόσο από ακουστικούς, όσο και από ορατούς συναγερμούς) με διακριτά σήματα που χρησιμοποιούνται για κάθε τύπο έκτακτης ανάγκης.
- Πραγματοποίηση περιοδικών ασκήσεων εξάσκησης, ώστε να διασφαλίζεται ότι οι εργαζόμενοι είναι εξοικειωμένοι με τους συναγερμούς και γνωρίζουν ενστικτωδώς πώς να αντιδράσουν. Οι σημασίες των διαφόρων σημάτων πρέπει να αναρτώνται σε όλους τους επιχειρησιακούς χώρους.
- Διαδικασίες για τους υπαλλήλους που επιβλέπουν κρίσιμες λειτουργίες κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος.
- Ενέργειες που πρέπει να αναλαμβάνει το προσωπικό που ανταποκρίνεται αρχικά σε διαρροές υδρογόνου, διαρροές, πυρκαγιές και έκτακτες καταστάσεις μεταφοράς.
- Θέση του εξοπλισμού αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης.
- Κατάλληλη αντίδραση κατάσβεσης πυρκαγιάς.
- Καθιέρωση ασφάλειας.
- Διαδικασίες καταγραφής όλων των εργαζομένων μετά την ολοκλήρωση της εκκένωσης έκτακτης ανάγκης.
- Διαδικασίες για τους εργαζόμενους που εκτελούν ιατρικές δραστηριότητες και δραστηριότητες διάσωσης.
- Τα προτιμώμενα μέσα για την αναφορά πυρκαγιών και άλλων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης (συμπεριλαμβανομένων των τηλεφωνικών αριθμών έκτακτης ανάγκης).
- Καθιέρωση και διατήρηση επικοινωνιών.
- Προετοιμασία για πιθανή κάλυψη από τα μέσα ενημέρωσης.
- Στοιχεία επικοινωνίας για πρόσωπα που μπορούν να παράσχουν πρόσθετες πληροφορίες ή επεξηγήσεις για τα καθήκοντα που καλύπτονται από το παρόν σχέδιο.

Επικίνδυνες περιοχές, κίνδυνοι που σχετίζονται με την εργασία σε επικίνδυνη περιοχή, απαιτήσεις για την εργασία σε καθορισμένη επικίνδυνη περιοχή, καταστάσεις στο χώρο εργασίας που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως επικίνδυνη περιοχή, κίνδυνοι που σχετίζονται με το περιβάλλον εργασίας παροχής αερίου καθώς και χαρακτηριστικά υδρογόνου.

Ορολογία της αντίδρασης του υδρογόνου

Ένα μόριο υδρογόνου διασπάται σε δύο άτομα ($H_2 \rightarrow 2H$) όταν παρέχεται ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από την ενέργεια διάσπασης (δηλαδή το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να σπάσει ο δεσμός που συγκρατεί τα άτομα του μορίου).

- Το υδρογόνο έχει το μικρότερο μέγεθος ατόμων/μορίων και χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη ικανότητα διάχυσης.
- Η διάχυση είναι η κίνηση σωματιδίων (ατόμων, μορίων ή ιόντων) μέσω ή μέσα σε μία διαπερατή ουσία.
- Η διάχυση του υδρογόνου συμβαίνει "μέσω των τοιχωμάτων ή των μεσοδιαστημάτων ενός δοχείου, σωληνώσεων ή υλικού διεπαφής". Για το σύστημα cGH_2 έχει ως αποτέλεσμα την αργή απελευθέρωση υδρογόνου.
- Το υδρογόνο διαπερνά τα μέταλλα σε ατομική μορφή, τα πολυμερή υλικά - σε μοριακή μορφή.
- Η διαπερατότητα είναι αμελητέα για δοχεία αποθήκευσης με μεταλλική επένδυση (τύποι I, II και III) και μπορεί να αποτελέσει ζήτημα ασφάλειας για δοχεία με πολυμερή επένδυση (τύποι IV και V). Ο ρυθμός διαπερατότητας του υδρογόνου μέσω ενός συγκεκριμένου υλικού (J σε $mol/s/m^2$) εξαρτάται από τη φύση του υλικού, τη θερμοκρασία (T σε K), την πίεση του δοχείου (p_r σε MPa) και το πάχος του τοιχώματος του δοχείου (l σε m).

$$J = P_0 \exp(-E_0 / RT) \frac{\sqrt{p_r}}{l}$$

Parameters dependent of the nature of the material:
 P_0 - pre-exponential factor ($mol/s/m/MPa^{1/2}$);
 E_0 - activation energy (J/mol)

- Όσο υψηλότερη είναι η πίεση αποθήκευσης, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός διαπερατότητας. Η διαπερατότητα από την αποθήκευση υδρογόνου επί του οχήματος αποτελεί ζήτημα ασφάλειας για τα περιβλήματα (παράδειγμα: ένα όχημα FC σταθμευμένο σε γκαράζ).
- Το υδρογόνο μπορεί να συσσωρευτεί με την πάροδο του χρόνου, δημιουργώντας ένα εύφλεκτο μείγμα με τον αέρα. Ως αποτέλεσμα της διεύθυνσης σε σφραγισμένα περιβλήματα χωρίς εξαερισμό, το κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας (LFL) των 4 vol. % υδρογόνου στον αέρα μπορεί να επιτευχθεί σε μεγάλο χρονικό διάστημα.

- Τρία κύρια φαινόμενα επηρεάζουν τη διασπορά του διαπερατού υδρογόνου: άνωση, διάχυση και αερισμός.

Κίνδυνοι από το υδρογόνο

Οι αναλύσεις των ατυχημάτων δείχνουν ότι οι ακόλουθοι παράγοντες είναι πρωταρχικής σημασίας για την πρόκληση βλαβών στο σύστημα:

- (α) μηχανική αστοχία του δοχείου συγκράτησης, των σωληνώσεων ή των βοηθητικών εξαρτημάτων (εύθραυστη αστοχία, ευθραυστότητα υδρογόνου ή κατάψυξη).
- (β) Αντίδραση του ρευστού με ένα μολυσματικό παράγοντα (όπως ο αέρας σε ένα σύστημα υδρογόνου).
- (γ) Αποτυχία σωστής λειτουργίας μιας διάταξης ασφαλείας.
- (δ) Λειτουργικό σφάλμα.

Οι αναλύσεις των ατυχημάτων έχουν δείξει ότι η αντίδραση, μέσω του σχεδιασμού ή των λειτουργικών διαδικασιών, σε μια αστοχία πρέπει να είναι τέτοια ώστε μια μεμονωμένη αστοχία να μην οδηγήσει σε μια σειρά αστοχιών ή σε μια αλυσιδωτή αντίδραση αστοχιών. Κάθε αστοχία πρέπει να περιορίζεται σε ένα τοπικό συμβάν- διαφορετικά, ο κίνδυνος και η πιθανότητα βλάβης αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο για ανάφλεξη.

Πυρκαγιές και εκρήξεις έχουν εκδηλωθεί σε διάφορα εξαρτήματα συστημάτων υδρογόνου ως αποτέλεσμα ποικίλων πηγών ανάφλεξης. Στις πηγές ανάφλεξης περιλαμβάνονται: μηχανικοί σπινθήρες από το γρήγορο κλείσιμο βαλβίδων, ηλεκτροστατικές εκκενώσεις σε μη γειωμένα φίλτρα σωματιδίων, σπινθήρες από ηλεκτρικό εξοπλισμό, εργασίες συγκόλλησης και κοπής, σωματίδια καταλυτών και πλήγματα κεραυνών κοντά στην καπνοδόχο εξαερισμού. Πάντα υπάρχει πιθανός κίνδυνος πυρκαγιάς όταν υπάρχει υδρογόνο.

Το πράσινο υδρογόνο (GH₂) διαχέεται ταχύτατα με τις αναταράξεις του αέρα να αυξάνουν το ρυθμό διασποράς του GH₂. Η εξάτμιση μπορεί να συμβεί γρήγορα σε μια διαρροή υγρού υδρογόνου (LH₂), με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εύφλεκτου μείγματος σε μεγάλη απόσταση. Παρόλο που μπορεί να μην υπάρχουν πηγές ανάφλεξης στο σημείο της διαρροής, μπορεί να εκδηλωθεί πυρκαγιά εάν η κίνηση του εύφλεκτου μείγματος το οδηγήσει σε μια πηγή ανάφλεξης. Παράδειγμα: Η παρατήρηση από μόνη της δεν αποτελεί αξιόπιστη τεχνική για την ανίχνευση πυρκαγιών καθαρού υδρογόνου-αέρα ή την εκτίμηση της σοβαρότητάς τους. Μία πυρκαγιά προέκυψε από ένα ατύχημα στο οποίο

αναπτύχθηκε μια μικρή διαρροή. Ο εξοπλισμός έκλεισε και η φλόγα φάνηκε να μειώνεται- ωστόσο, οι σταγόνες λιωμένου μετάλλου από τον εξοπλισμό έδειξαν ότι βρισκόταν σε εξέλιξη μια πιο σοβαρή πυρκαγιά. Θα μπορούσε να προκληθεί αναφλέξη εάν ένα μείγμα εντός των ορίων αναφλεξιμότητας αναφλεγεί σε ένα μόνο σημείο.



Ασφάλεια υδρογόνου: Επίδειξη φλόγας υδρογόνου

Φυσιολογικοί κίνδυνοι

Το προσωπικό που είναι παρόν κατά τη διάρκεια διαρροών, πυρκαγιών ή εκρήξεων συστημάτων υδρογόνου μπορεί να υποστεί διάφορους τύπους τραυματισμών. Η ασφυξία αποτελεί κίνδυνο όταν κάποιος εισέρχεται σε μια περιοχή όπου το υδρογόνο ή ένα αέριο καθαρισμού έχει εκτοπίσει τον αέρα, αραιώνοντας το οξυγόνο κάτω από 19,5 τοις εκατό κατ' όγκο.

Τα κύματα έκρηξης από εκρήξεις θα προκαλέσουν τραυματισμό ως αποτέλεσμα της υπερπίεσης σε μια δεδομένη θέση ή του συνδυασμού υπερπίεσης και διάρκειας σε μια δεδομένη θέση.

Η ακτινοβολούμενη θερμότητα που φτάνει και απορροφάται από ένα άτομο από μια φλόγα GH₂-αέρα είναι ευθέως ανάλογη με μια ποικιλία παραγόντων, όπως ο χρόνος έκθεσης, ο ρυθμός καύσης, η θερμότητα καύσης, το μέγεθος της επιφάνειας καύσης και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες (ιδίως οι υδρατμοί).

Τα κρυογενετικά εγκαύματα προκύπτουν από την επαφή με ψυχρά υγρά ή ψυχρές επιφάνειες δοχείων.

Η έκθεση σε μεγάλες διαρροές LH₂ θα μπορούσε να οδηγήσει σε υποθερμία εάν δεν ληφθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις.

Συγκρούσεις κατά τη μεταφορά. Ζημιές στα συστήματα μεταφοράς υδρογόνου (οδικά, σιδηροδρομικά, εναέρια και υδάτινα) μπορεί να προκαλέσουν διαρροές και διαρροές που μπορεί να οδηγήσουν σε πυρκαγιές και εκρήξεις. Τα περισσότερα περιστατικά κατά τη μεταφορά συνέβησαν εκτός βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Το 71% των απελευθερώσεων υδρογόνου δεν οδήγησαν σε ανάφλεξη. Οι σχετικά λίγες αναφλέξεις μπορεί να οφείλονται στην έλλειψη πηγών ανάφλεξης ή στην ταχεία διασπορά του υδρογόνου στην ατμόσφαιρα. Σε κάθε περίπτωση, τα στοιχεία για τα ατυχήματα παρέχουν περαιτέρω κίνητρα για τη μεταφορά, τη μεταβίβαση και την αποθήκευση του υδρογόνου σε εξωτερικούς χώρους, μακριά από κατοικημένες περιοχές.



Συνήθεις αιτίες ατυχημάτων και ανάφλεξης υδρογόνου

Γενικά. Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη χρήση του υδρογόνου μπορούν να χαρακτηριστούν ως φυσιολογικοί (κρυοπαγήματα, αναπνευστικές παθήσεις και ασφυξία), φυσικοί (αλλαγές φάσεων,



αστοχίες εξαρτημάτων και ευθραυστότητα) και χημικοί (ανάφλεξη και καύση). Στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανίζεται ένας συνδυασμός κινδύνων. Ο πρωταρχικός κίνδυνος που συνδέεται με οποιαδήποτε μορφή υδρογόνου είναι η ακούσια παραγωγή εύφλεκτου ή πυροδοτούμενου μείγματος, που οδηγεί σε πυρκαγιά ή έκρηξη. Η ασφάλεια θα βελτιωθεί όταν οι σχεδιαστές και το επιχειρησιακό προσωπικό γνωρίζουν τους ειδικούς κινδύνους που συνδέονται με το χειρισμό και τη χρήση του υδρογόνου.

Διαρροές

Διαρροές μπορεί να προκύψουν εντός ενός συστήματος ή στο γύρω περιβάλλον. Κίνδυνοι μπορεί να προκύψουν από διαρροή αέρα ή ρύπων σε ένα σύστημα ψυχρού υδρογόνου. Οι διαρροές συνήθως προκαλούνται από παραμορφωμένες σφραγίδες ή παρεμβύσματα, κακή ευθυγράμμιση των βαλβίδων ή βλάβες των φλαντζών ή του εξοπλισμού. Μια διαρροή μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω αστοχίες των υλικών κατασκευής. Για διαρροές που αφορούν LH₂, η εξάτμιση του ψυχρού υδρογόνου στην ατμόσφαιρα μπορεί να αποτελέσει προειδοποίηση, επειδή η υγρασία συμπυκνώνεται και σχηματίζει ομίχλη. Οι μη εντοπισμένες διαρροές υδρογόνου μπορεί να οδηγήσουν σε πυρκαγιές και εκρήξεις.

Διασπορά υδρογόνου

Μία ιδιότητα του υδρογόνου που τείνει να περιορίσει την οριζόντια εξάπλωση των εύφλεκτων μειγμάτων από μια διαρροή υδρογόνου είναι η πλευστότητά του. Αν και το κορεσμένο υδρογόνο είναι βαρύτερο από τον αέρα στις θερμοκρασίες που επικρατούν μετά την εξάτμιση από μια διαρροή, γίνεται γρήγορα ελαφρύτερο από τον αέρα, καθιστώντας το νέφος θετικά πλευστό. Η διασπορά του νέφους επηρεάζεται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου και μπορεί να επηρεαστεί από τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις και τις κοντινές κατασκευές. Αν και η συμπυκνωμένη υγρασία αποτελεί ένδειξη ψυχρού υδρογόνου, το σχήμα της ομίχλης δεν δίνει ακριβή περιγραφή της θέσης του νέφους υδρογόνου. Η χρήση αναχωμάτων ή οδοφραγμάτων γύρω από τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά, διότι είναι προτιμότερο να διασκορπιστούν τυχόν διαρρεύσεις ή διαρροές LH₂ ή SLH₂ όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Τα αναχώματα ή τα οδοφράγματα γενικά δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται, εκτός εάν ο σκοπός τους είναι να περιορίσουν ή να μειώσουν την εξάπλωση μιας διαρροής υγρού λόγω κοντινών κτιρίων, πηγών ανάφλεξης κ.λπ. Ωστόσο, ένας τέτοιος περιορισμός μπορεί να καθυστερήσει τη διασπορά οποιουδήποτε διαρρεύσαντος υγρού περιορίζοντας τον ρυθμό εξάτμισης και θα μπορούσε να επηρεάσει ένα συμβάν καύσης που μπορεί να συμβεί.



Αποτυχία αποθήκευσης δοχείου

Η απελευθέρωση GH₂ ή LH₂ μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη και καύση, προκαλώντας πυρκαγιές και εκρήξεις. Οι ζημιές μπορεί να επεκταθούν σε σημαντικά ευρύτερες περιοχές από τις θέσεις αποθήκευσης λόγω της κίνησης του νέφους υδρογόνου. Η αστοχία του δοχείου μπορεί να ξεκινήσει από αστοχία υλικού, υπερβολική πίεση που προκαλείται από διαρροή θερμότητας ή αστοχία του συστήματος ανακούφισης πίεσης.

Τα ατυχήματα στο σύστημα εξαερισμού και εξάτμισης αποδίδονται στον ανεπαρκή εξαερισμό και στην ακούσια είσοδο αέρα στον εξαερισμό. Η παλινδρόμηση του αέρα μπορεί να αποτραπεί με κατάλληλα σχέδια στομίων εξαερισμού, παροχή αέρα αναπλήρωσης (ή επαρκή παροχή αδρανούς αερίου ανάλογα με την περίπτωση), βαλβίδες ελέγχου ή μοριακές σφραγίδες.

Καθαρισμός

Οι σωλήνες και τα δοχεία πρέπει να καθαρίζονται με αδρανές αέριο πριν και μετά τη χρήση υδρογόνου στον εξοπλισμό. Το άζωτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εάν η θερμοκρασία του συστήματος είναι πάνω από 80 K (-316 °F), ενώ το ήλιο πρέπει να χρησιμοποιείται εάν η θερμοκρασία είναι κάτω από 80 K (-316 °F). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθαρισμός GH₂ για να θερμανθεί το σύστημα στους 80 K (-316 °F) και στη συνέχεια να γίνει μετάβαση σε καθαρισμό με άζωτο εάν το σύστημα είναι κάτω από 80 K (-316 °F). Ωστόσο, μπορεί να εμφανιστεί κάποια συμπύκνωση του GH₂ εάν το σύστημα περιέχει LH₂. Υπολειμματικοί θύλακες υδρογόνου ή του αερίου καθαρισμού θα παραμείνουν στο περίβλημα εάν ο ρυθμός καθαρισμού, η διάρκεια ή η έκταση της ανάμιξης είναι πολύ χαμηλοί.

Παράδειγμα: Μια επικίνδυνη πρακτική καθαρισμού που οδήγησε σε έκρηξη συνέβη όταν απομονώθηκε μόνο ένα τμήμα ενός συστήματος υδρογόνου για να μειωθεί ο χρόνος και ο όγκος καθαρισμού. Η πλήρης απομόνωση συνήθως δεν μπορεί να διασφαλιστεί λόγω της τάσης του υδρογόνου να διαρρέει.

Αποτυχία συστήματος εξάτμισης

Οι βαλβίδες των σωλήνων στα συστήματα εξάτμισης μπορεί να αποτύχουν, προκαλώντας τραυματισμό από έκθεση σε χαμηλή θερμοκρασία. Μπορεί να συμβεί ανάφλεξη του υδρογόνου, με αποτέλεσμα ζημιές από πυρκαγιές και εκρήξεις.



Συμπύκνωση του αέρα

Μια μη μονωμένη γραμμή που περιέχει LH₂ ή κρύο αέριο υδρογόνο, όπως μια γραμμή εξαερισμού, μπορεί να είναι αρκετά κρύα (λιγότερο από 90 K (-298 °F) σε 101,3 kPa (14,7 psia)) ώστε να συμπυκνώνεται αέρας στο εξωτερικό του σωλήνα. Ο συμπυκνωμένος αέρας, ο οποίος μπορεί να είναι εμπλουτισμένος σε οξυγόνο σε ποσοστό περίπου 50 %, δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με ευαίσθητα υλικά ή εξοπλισμό. Τα υλικά που δεν είναι κατάλληλα για χαμηλές θερμοκρασίες, όπως ο ανθρακούχος χάλυβας, μπορεί να θρυμματιστούν και να αστοχήσουν. Τα κινούμενα μέρη και ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά. Ο συμπυκνωμένος αέρας δεν επιτρέπεται να στάζει πάνω σε εύφλεκτα υλικά, όπως πίσσα και άσφαλτος, καθώς από αυτό ενδέχεται να δημιουργηθεί εκρηκτικό μείγμα.

Ευθραυστότητα υδρογόνου

Τα συστήματα περιορισμού μπορεί να αποτύχουν και οι επακόλουθες διαρροές θα δημιουργήσουν κινδύνους όταν οι μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών υποβαθμιστούν από την ευθραυστότητα του υδρογόνου. Η ευθραυστότητα του υδρογόνου είναι μακροχρόνιο φαινόμενο και προκύπτει από τη συνεχή χρήση ενός συστήματος υδρογόνου. Ειδικότερα, οι ρήξεις σωληνώσεων και δοχείων προκαλούνται από προβλήματα υλικών που περιλαμβάνουν ευθραυστότητα υδρογόνου, διάβρωση λόγω τάσεων και αστοχίες συγκολλήσεων. Οι περισσότερες ζημιές προκλήθηκαν από την ανάφλεξη του υδρογόνου μετά τη ρήξη. Όλες οι επισκευές και οι τροποποιήσεις στις σωληνώσεις και τον εξοπλισμό που διαχειρίζεται υδρογόνο πρέπει να σχεδιάζονται και να δοκιμάζονται προσεκτικά.

Τύποι ατυχημάτων και οι συνέπειές τους

Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ατυχημάτων με υδρογόνο είναι η σοβαρότητα των συνεπειών τους, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Consequences	On a sample comprising 213 cases with known consequences	
	Nb of cases	%
Deaths	25	12
Serious injuries	28	13
Injuries (including serious ones)	70	33
Internal material damage	183	86
External material damage	17	8
Internal operating losses	89	42
Evacuated population	8	3,8

Πίνακας 1 https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/SY_hydrogen_GB_2009.pdf

25 θανατηφόρα ατυχήματα με υδρογόνο, εκ των οποίων 5 γαλλικά ατυχήματα, αποτελούν το 12 % του δείγματος που μελετήθηκε. Τα ατυχήματα με και χωρίς σοβαρούς τραυματισμούς αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το 13 και 33 % του μελετηθέντος δείγματος. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι ανθρώπινες συνέπειες των ατυχημάτων που σχετίζονται με το υδρογόνο αφορούν κυρίως τους εργαζόμενους στους χώρους καταστροφής. Οι εργαζόμενοι διάσωσης και το ευρύ κοινό επηρεάζονται μόνο σπάνια. Έτσι, όλα τα θανατηφόρα ατυχήματα των οποίων οι θάνατοι αναφέρονται λεπτομερώς αφορούν εργαζόμενους. Τα γεγονότα αυτά σχετίζονται με την τυπολογία των ατυχημάτων που αφορούν το υδρογόνο, καθώς και με την ταχεία κινητική των υποκείμενων φαινομένων: το 84% των γεγονότων που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν πυρκαγιές ή/και εκρήξεις. Το υπόλοιπο 16% αφορά μη αναφλεγμένες διαρροές H₂, ανεξέλεγκτες αντιδράσεις χωρίς έκρηξη ή διάβρωση που ανιχνεύεται πριν από το ατύχημα.

Ο ακόλουθος πίνακας παραθέτει τους κύριους τομείς δραστηριότητας που αφορούν ατυχήματα με υδρογόνο:

Activities	On a 215 cases sample	
	Nb of cases	%
Chemical sector*	84	39
Refining / petrochemical industry*	47	22
Transport, packaging and storage	35	16
Metallurgy / metal works	17	7,9
Waste treatment / recycling	8	3,7
Nuclear industry	5	2,3

* excluding transport, packaging and storage

Πίνακας 2 https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/SY_hydrogen_GB_2009.pdf

Ένα από τα προαναφερθέντα ατυχήματα συνέβη στο Saint-Fons (69), το 1988, όταν είχαν προγραμματιστεί εργασίες λείανσης σε δεξαμενή που είχε αποθηκευμένο θειικό οξύ. Όλες οι διαδικασίες λειτουργίας εκτελέστηκαν σωστά. Παρ' όλα αυτά, κατά την έναρξη της λειτουργίας σημειώθηκε εκπυρσοκρότηση στο εσωτερικό της δεξαμενής. Οι απώλειες περιλαμβάνουν ένα θάνατο και δύο περιπτώσεις σοβαρού τραυματισμού. Η δεξαμενή καταστράφηκε εν μέρει. Η έκρηξη συνέβη λόγω της παρουσίας υδρογόνου (100 g) σε νεκρή περιοχή όπου δεν είχαν γίνει μετρήσεις. Το υδρογόνο προήλθε από τη διάβρωση της σιδερένιας δεξαμενής υπό την επίδραση θειικού οξέος.

Μπορούν να προσδιοριστούν δύο τύποι δραστηριοτήτων:

- δραστηριότητες όπου το υδρογόνο είτε παράγεται είτε χρησιμοποιείται, όπως η χημική βιομηχανία, η διύλιση, οι μεταφορές, η συσκευασία, η πυρηνική βιομηχανία,
- δραστηριότητες στις οποίες το υδρογόνο παράγεται τυχαία, όπως η μεταλλουργία και οι μεταλλουργίες, η υγιεινή, η επεξεργασία και η ανακύκλωση αποβλήτων.

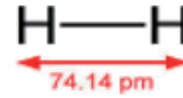
Το **διυδρογόνο** είναι αέριο σε θερμοκρασία δωματίου και πίεση. Δεν μπορεί να ανιχνευθεί από τον άνθρωπο, καθώς είναι άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό και βρίσκεται σε ίχνη στην ατμόσφαιρα. Οι κύριες φυσικοχημικές ιδιότητες του υδρογόνου προκαλούν ειδικούς κινδύνους που θα συζητηθούν στη συνέχεια.

Αυτές περιλαμβάνουν:

These include:

- χαμηλή μοριακή μάζα και μικρό μέγεθος που του δίνουν μεγάλη τάση διαρροής,
- ακραία ευφλεκτότητα και χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης,
- ικανότητα να ευθραυστοποιεί μέταλλα και κράματα μεταβάλλοντας τις μηχανικές τους ιδιότητες,
- βίαιες αντιδράσεις με ορισμένες ενώσεις λόγω των αναγωγικών ιδιοτήτων του.

Dihydrogen



Formula	H ₂
Molar mass	2,016 g/mol
Mass per vol. of gaz (20°C/1 atm)	0,08342 kg/Nm ³
Water solubility (vol/vol at 15,6°C)	0,019
Boiling point (1 atm)	-252,8 °C
Mass per vol. of liquid at boiling point	70,96 kg/m ³

Figure 3 https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/SY_hydrogen_GB_2009.pdf

Ορολογίες καύσης

Η καύση, ή καύση, είναι μια χημική διεργασία που περιλαμβάνει την απελευθέρωση ενέργειας από ένα μείγμα καυσίμου και αέρα. Στην περίπτωση της καύσης υδρογόνου, υγρό ή αέριο υδρογόνο καίγεται σε τροποποιημένο κινητήρα αεριοστροβίλου για την παραγωγή ώσης. Η διαδικασία αυτή είναι πανομοιότυπη με την παραδοσιακή εσωτερική καύση, με τη διαφορά ότι το υδρογόνο αντικαθιστά το αντίστοιχο ορυκτό καύσιμο.

Αποτελούμενος από έναν σταθερό κύλινδρο και ένα ή περισσότερα κινούμενα έμβολα, ένας κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα λειτουργεί με τον ακόλουθο τρόπο:

- Κατά τη διαδικασία εισαγωγής, το καύσιμο αναμιγνύεται με τον αέρα και εισάγεται στον κύλινδρο.
- Στη συνέχεια, το έμβολο συμπιέζει το μείγμα καυσίμου-αέρα, το οποίο αναφλέγεται με σπινθήρα.

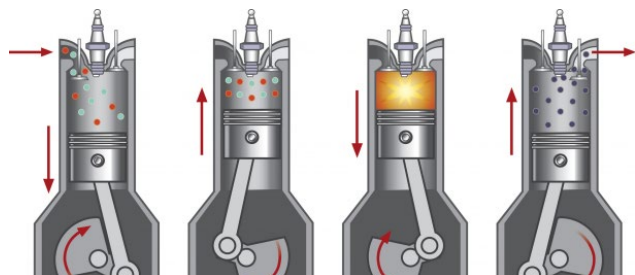


Figure 4 <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-hydrogen-combustion-explained#:~:text=Consisting%20of%20a%20fixed%20cylinder,Ignition%20results%20in%20combustion.>

- Η ανάφλεξη έχει ως αποτέλεσμα την καύση. Τα διογκούμενα αέρια καύσης κινούν το έμβολο, το οποίο περιστρέφει τον στροφαλοφόρο άξονα.
- Αυτή η περιστροφική κίνηση περιστρέφει τους τροχούς, στην περίπτωση των αυτοκινήτων.

Το υδρογόνο έχει πολλές μοναδικές ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για καύση, όπως οι ακόλουθες:

- Ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας: Το υδρογόνο μπορεί να καεί μέσω ενός ευρέος φάσματος μειγμάτων καυσίμου-αέρα. Στην πραγματικότητα, το υδρογόνο μπορεί να λειτουργήσει με "φτωχό" μείγμα, που σημαίνει ότι η ποσότητα καυσίμου είναι μικρότερη από την ποσότητα που απαιτείται για την καύση με δεδομένη ποσότητα αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου και γενικά χαμηλότερη τελική θερμοκρασία καύσης, η οποία μειώνει τον αριθμό των ρύπων, όπως τα NOx, που εκπέμπονται μέσω της εξάτμισης.
- Υψηλή θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης: Η υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου επιτρέπει υψηλότερες σχέσεις συμπίεσης σε έναν κινητήρα υδρογόνου σε σύγκριση με έναν κινητήρα υδρογονανθράκων.
- Ένας υψηλότερος λόγος συμπίεσης έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη θερμική απόδοση, ή λιγότερες απώλειες ενέργειας κατά την καύση.

Συμβατότητα υδρογόνου

- Το υδρογόνο έχει πολύ μικρό μέγεθος ατόμων και χαμηλό ιξώδες.
- Το υδρογόνο μπορεί εύκολα να απορροφηθεί από διάφορα υλικά (συμπεριλαμβανομένων εκείνων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υδρογόνου). Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες διαρροές υδρογόνου και δομικές αστοχίες.
- Η σωστή επιλογή των κατάλληλων υλικών για την αποθήκευση υδρογόνου αποτελεί κρίσιμο μέτρο ασφαλείας.
- Επηρεάζουν τις σωληνώσεις, τα τοιχώματα των δοχείων αποθήκευσης, τους συνδέσμους πλήρωσης, τις βαλβίδες, τα εξαρτήματα κ.λπ.

Η συμβατότητα του υδρογόνου με τα μεταλλικά υλικά επηρεάζεται από χημικές αλληλεπιδράσεις και φυσικές επιδράσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Διάβρωση (ξηρή διάβρωση (σε υψηλές θερμοκρασίες, προσβολή από υδρογόνο), υγρή διάβρωση (πιο συνηθισμένη, προκαλείται από την υγρασία), διάβρωση που προκαλείται από ακαθαρσίες σε ένα αέριο Το ίδιο το υδρογόνο είναι ένα μη διαβρωτικό αέριο.

Η [αθόρυβη ταινία](#) που δείχνει φυσαλίδες υδρογόνου να αναδύονται από τον χάλυβα, σε ελαττώματα και άλλα σημεία.



Ευθραυστότητα υδρογόνου (HE)

- Embrittlement at low temperatures ('cold embrittlement')
- Embrittlement is a loss of a metal ductility. Due to hydrogen ad-/absorption a material becomes brittle and can fracture.
- HE (an entry of hydrogen into a material) occurs at lower temperatures (nearly ambient).
- HE negatively affects three basic systems: production, transportation/storage and use.
- At higher temperatures (above 200 oC) hydrogen attack takes place.
- Hydrogen can be either in atomic or in molecular form.
- No clear mechanism of HE. Several mechanisms suggested:
 - i. Formation of hydrogen solution in a metal lattice
 - ii. Hydrogen adsorption on the surface, and on the subsurface of a metal
 - iii. Hydrogen accumulation in structure defects (grain boundaries, vacancies dislocations) Hydrogen can form compounds within a metal lattice (metal hydrides or methane).

High strength steels are susceptible to HE the most. Hydrogen can enter a material via several routes:

- Manufacturing operations (welding, electroplating, pickling etc).
- As a by-product of wet corrosion of a metal.

- Surface treatment (e.g., cathode protection of a metal against corrosion).
- Adsorption on a metal surface.
- Ευθραυστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες ("ψυχρή ευθραυστότητα")
- Η ευθραυστότητα είναι η απώλεια της ολκιμότητας ενός μετάλλου. Λόγω προσθήκης/απορρόφησης υδρογόνου ένα υλικό γίνεται εύθραυστο και μπορεί να σπάσει.
- Η ΗΕ (είσοδος υδρογόνου σε ένα υλικό) συμβαίνει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (σχεδόν περιβάλλοντος).
- Η ΗΕ επηρεάζει αρνητικά τρία βασικά συστήματα: παραγωγή, μεταφορά/αποθήκευση και χρήση.
- Σε υψηλότερες θερμοκρασίες (πάνω από 200 οC) λαμβάνει χώρα προσβολή από υδρογόνο.
- Το υδρογόνο μπορεί να είναι είτε σε ατομική είτε σε μοριακή μορφή.
- Δεν υπάρχει σαφής μηχανισμός του ΗΕ. Προτείνονται διάφοροι μηχανισμοί:
 - i. Σχηματισμός διαλύματος υδρογόνου σε μεταλλικό πλέγμα
 - ii. Προσρόφηση υδρογόνου στην επιφάνεια και στο υπέδαφος ενός μετάλλου.
 - iii. Συσσώρευση υδρογόνου σε ατέλειες της δομής (όρια κόκκων, κενές θέσεις εξαρθρώσεις) Το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει ενώσεις μέσα σε ένα μεταλλικό πλέγμα (υδρίδια μετάλλων ή μεθάνιο).
- Οι χάλυβες υψηλής αντοχής είναι περισσότερο ευαίσθητοι στο ΗΕ. Το υδρογόνο μπορεί να εισέλθει σε ένα υλικό μέσω διαφόρων οδών:
- Εργασίες κατασκευής (συγκόλληση, ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση, πάστωμα κ.λπ.).
- Ως παραπροϊόν της υγρής διάβρωσης ενός μετάλλου.
- Επιφανειακή επεξεργασία (π.χ. καθοδική προστασία ενός μετάλλου από τη διάβρωση).
- Προσρόφηση σε μεταλλική επιφάνεια.

Η ΗΕ εμφανίζεται όταν το υλικό υποβάλλεται σε ατμόσφαιρα υδρογόνου, π.χ. σε δεξαμενές αποθήκευσης:

- Εσωτερική αναστρέψιμη ΗΕ - συμβαίνει όταν το υδρογόνο εισέρχεται στο μέταλλο κατά την επεξεργασία του- μπορεί να οδηγήσει σε δομική αστοχία ενός υλικού που δεν έχει εκτεθεί ποτέ στο παρελθόν σε υδρογόνο.
- Ευθραυστότητα λόγω αντίδρασης υδρογόνου - εμφανίζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες όταν το υδρογόνο αντιδρά χημικά με ένα συστατικό του μετάλλου για να σχηματίσει ένα νέο μικροδομικό στοιχείο ή φάση όπως ένα υδρίδιο ή για να δημιουργήσει φυσαλίδες αερίου, γνωστές και ως φουσκάλες.



Ένα υλικό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται εάν δεν υπάρχουν στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι είναι κατάλληλο για τις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας. Σε περίπτωση αμφιβολίας, το υλικό μπορεί να υποβληθεί σε δοκιμή ευαισθησίας HE (π.χ. ISO 11114-4).

- ISO/TR 15916:2015 Βασικές εκτιμήσεις για την ασφάλεια συστημάτων υδρογόνου.
- Μέταλλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς προφυλάξεις: ορείχαλκος και κράματα χαλκού (π.χ. κύβος χαλκού βηρυλλίου)- αλουμίνιο και κράματά του.
- Υλικά ιδιαίτερα ευαίσθητα στο ΥΕ: νικέλιο και κράματα νικελίου υψηλής περιεκτικότητας- τιτάνιο και τα κράματά του.
- Πολλά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια υπό ελεγχόμενες συνθήκες (π.χ. περιορισμένη καταπόνηση, απουσία επιφανειακών ατελειών κ.λπ.).
- Το υλικό που επηρεάζεται από HE μπορεί να αστοχήσει πρόωρα και μερικές φορές με καταστροφικό τρόπο όταν εφαρμόζεται τάση.

Διαδικασίες και σκοπός ασφαλούς αποθήκευσης - Γιατί είναι σημαντική η αποθήκευση υδρογόνου

Η αποθήκευση υδρογόνου είναι σημαντική για να αποτελέσει μέρος του μελλοντικού μείγματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τις διεθνείς προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών και της χρήσης καυσίμων με βάση τον άνθρακα, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου θα μπορούσαν να συμβάλουν στη δημιουργία μιας πιο πράσινης λύσης για τις ανάγκες παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της τροφοδοσίας από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές έως οχήματα, αεροσκάφη, ακόμη και ολόκληρα κτίρια.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του υδρογόνου ως πηγή ενέργειας είναι ότι μπορεί να παραχθεί με ηλεκτρόλυση από ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από πλεονάζουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επιτρέποντας ταυτόχρονα στο υδρογόνο να καλύψει μια αντίστοιχη ενεργειακή ζήτηση. Εναλλακτικά, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, η ενέργεια αυτή δεν χάνεται με την πάροδο του χρόνου και επομένως μπορεί να παραχθεί και να αποθηκευτεί σε βιομηχανική κλίμακα ως μέρος ενός πράσινου ενεργειακού μείγματος. Αυτό το αποθηκευμένο υδρογόνο μπορεί στη συνέχεια να ανακτηθεί ως εφεδρική παροχή ενέργειας όταν χρειάζεται.

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματική πηγή καυσίμου μαζί με τις μπαταρίες στον τομέα των μεταφορών. Το σύστημα υδρογόνου παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της αποθήκευσης ενέργειας και μια μπαταρία μικρής χωρητικότητας θα λειτουργεί ως ρυθμιστικό



στοιχείο για την παροχή αναγεννητικής πέδησης, την κάλυψη τυχόν ξαφνικών αυξημένων απαιτήσεων ισχύος και την αύξηση της διάρκειας ζωής των κυψελών καυσίμου υδρογόνου, αντιδρώντας στις αλλαγές φορτίου. Αυτή η συμπληρωματική μέθοδος καυσίμου χρησιμοποιείται ήδη σε ορισμένα εμπορικά διαθέσιμα οχήματα, όπως το αυτοκίνητο υδρογόνου Honda FCX Clarity. Φυσικά, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου χρησιμοποιούνται ήδη με ασφάλεια εδώ και δεκαετίες για την παροχή καθαρής ενέργειας για περνοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα που πρέπει να λειτουργούν καθαρά σε εσωτερικούς χώρους.

Η αποθήκευση υδρογόνου είναι σημαντική για να αποτελέσει μέρος των μελλοντικών μας καθαρών ενεργειακών λύσεων, ωστόσο απαιτείται περισσότερη έρευνα και βελτίωση των υποδομών προκειμένου το υδρογόνο να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές του.

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

1. Ως αέριο υπό υψηλή πίεση
2. Σε υγρή μορφή σε κρυογονικές θερμοκρασίες
3. Στην επιφάνεια ή εντός στερεών και υγρών υλικών

Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές αποθήκευσης έχει τις δικές της απαιτήσεις και προκλήσεις, όπως φαίνεται παρακάτω:

Συμπιεσμένο αέριο

Το υδρογόνο μπορεί να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί σε αέρια μορφή υπό υψηλές πιέσεις. Αυτό απαιτεί δεξαμενές αποθήκευσης με πίεση 350-700 bar ή 5000-10.000 psi.

Αποθήκευση κρυογονικών υγρών

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί κρυογονικά σε υγρή μορφή. Απαιτούνται χαμηλές θερμοκρασίες για να σταματήσει το υγρό υδρογόνο να βράζει και πάλι σε αέριο, κάτι που συμβαίνει στους $-252,8^{\circ}\text{C}$. Το υγρό υδρογόνο έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το αέριο υδρογόνο, αλλά η μεταφορά του στις απαιτούμενες θερμοκρασίες μπορεί να είναι δαπανηρή. Επιπλέον, οι δεξαμενές αποθήκευσης και οι εγκαταστάσεις για την κρυογονική αποθήκευση υγρού υδρογόνου πρέπει να είναι μονωμένες ώστε να αποτρέπεται η εξάτμιση σε περίπτωση που μεταφερθεί θερμότητα στο υγρό υδρογόνο λόγω αγωγιμότητας, συναγωγής ή ακτινοβολίας. Παρά τις προκλήσεις αυτές, το υγρό υδρογόνο έχει ζήτηση για εφαρμογές που απαιτούν υψηλά επίπεδα καθαρότητας και χρησιμοποιείται στα διαστημικά ταξίδια.

Συνδυασμένο υδρογόνο ψυχρής και κρυοσυμπίεσης

Οι μέθοδοι αποθήκευσης της συμπίεσης και της κρυογονικής ψύξης που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω μπορούν επίσης να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν μια περαιτέρω εξέλιξη της αποθήκευσης υδρογόνου. Σε αυτή την περίπτωση, το υδρογόνο ψύχεται πριν συμπιεστεί. Αυτό δημιουργεί υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από ό,τι με το συμπιεσμένο υδρογόνο, αλλά, όπως και με την κρυογονική αποθήκευση υγρών, απαιτεί επίσης μεγαλύτερη χρήση ενέργειας για να επιτευχθεί.

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για αυτούς τους διαφορετικούς τύπους αποθήκευσης υδρογόνου είναι ίση με το 9-12% της ενέργειας που διατίθεται για τη συμπίεση (από 1 έως 350 ή 700 bar) και περίπου 30% για την υγροποίηση. Η χρήση ενέργειας ποικίλλει ανάλογα με την ακριβή μέθοδο, τις ποσότητες και τις εξωτερικές συνθήκες- ωστόσο, διεξάγονται εργασίες για την εξεύρεση οικονομικότερων μεθόδων αποθήκευσης με μικρότερη απαιτούμενη ενεργειακή εισροή.

Αποθήκευση υδρογόνου με βάση υλικά

Εκτός από τη συμπίεση ως αέριο ή την αποθήκευση ως υγρό, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί με τη χρήση υλικών. Υπάρχουν τρεις τύποι υλικών αποθήκευσης υδρογόνου: εκείνα που χρησιμοποιούν προσρόφηση για την αποθήκευση υδρογόνου στην επιφάνεια του υλικού, εκείνα που χρησιμοποιούν απορρόφηση για την αποθήκευση του υδρογόνου στο εσωτερικό του υλικού και η αποθήκευση υδριδίων, η οποία χρησιμοποιεί συνδυασμό στερεών υλικών και υγρού.

- Στην προσρόφηση, μόρια ή άτομα υδρογόνου προσκολλώνται στην επιφάνεια του υλικού. Σε αυτή τη μέθοδο, το υδρογόνο προσκολλάται σε υλικά με μεγάλη επιφάνεια, συμπεριλαμβανομένων των μικροπορωδών ενώσεων οργανομεταλλικού σκελετού (metal-organic frameworks (MOFs)), των μικροπορωδών κρυσταλλικών αργιλοπυριτικών αλάτων (ζεόλιθοι) ή των μικροσκοπικά μικρών νανοσωλήνων άνθρακα.
- Η προσρόφηση υδρογόνου σε υλικά σε μορφή σκόνης μπορεί να επιτύχει υψηλές πυκνότητες ογκομετρικής αποθήκευσης λόγω της αυξημένης επιφάνειας για το προσροφητικό υλικό. Κατά την απορρόφηση, το υδρογόνο διαχωρίζεται σε άτομα υδρογόνου που ενσωματώνονται στο εσωτερικό στερεό πλέγμα του υλικού.
- Η αποθήκευση υδριδίων, το τρίτο από αυτά τα υλικά συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου, μπορεί να χρησιμοποιήσει την αντίδραση υλικών που περιέχουν υδρογόνο με νερό ή άλλες υγρές ενώσεις, όπως οι αλκοόλες. Με αυτή τη μέθοδο αποθήκευσης υδρογόνου, γνωστή και ως "χημική αποθήκευση υδρογόνου", το υδρογόνο αποθηκεύεται αποτελεσματικά τόσο στο υλικό όσο και στο υγρό.

- Τα συστήματα αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων λειτουργούν με το υδρογόνο να σχηματίζει μια ενδιάμεση ένωση με στοιχειώδη μέταλλα όπως το παλλάδιο, το μαγνήσιο και το λανθάνιο, με διαμεταλλικές ενώσεις, με ελαφρά μέταλλα όπως το αλουμίνιο ή με ορισμένα κράματα. Αυτά τα μεταλλικά υδρίδια προσροφούν μοριακό υδρογόνο στην επιφάνειά τους και στη συνέχεια το ενσωματώνουν σε στοιχειακή μορφή στο μεταλλικό πλέγμα με παραγωγή θερμότητας. Μπορούν να απελευθερωθούν και πάλι με παραγωγή θερμότητας και αυτά τα υδρίδια μπορούν να απορροφήσουν μεγάλους όγκους αερίου, με το παλλάδιο, για παράδειγμα, να μπορεί να απορροφήσει όγκους υδρογόνου 900 φορές μεγαλύτερους από τους δικούς του.

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να συνδεθεί χημικά με έναν υγρό οργανικό φορέα υδρογόνου. Αυτές οι χημικές ενώσεις έχουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης υδρογόνου και περιλαμβάνουν το παράγωγο καρβαζόλης N-αιθυλοκαρβαζόλη και το τολουόλιο.

Αυτές οι μέθοδοι που βασίζονται σε υλικά επιτρέπουν την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου από υλικά μικρότερου όγκου, σε χαμηλότερη πίεση και σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία δωματίου. Η αποθήκευση με βάση τα υλικά μπορεί να επιτρέψει ογκομετρικές πυκνότητες αποθήκευσης μεγαλύτερες από εκείνες του υγρού υδρογόνου. Ωστόσο, η αποθήκευση με βάση τα υλικά βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη, καθώς το κόστος φόρτισης και εκφόρτισης και επεξεργασίας του υδρογόνου θεωρείται ακόμη πολύ υψηλό καθώς και χρονοβόρο.

Υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου

Αλατοσπήλαια, εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου ή υδροφορείς μπορούν να παρέχουν υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου σε βιομηχανική κλίμακα. Τέτοιοι υπόγειοι χώροι αποθήκευσης χρησιμοποιούνται εδώ και χρόνια για το φυσικό αέριο και το αργό πετρέλαιο, όπου κρατούνταν για να εξισορροπήσουν τις διακυμάνσεις της προσφοράς ή της ζήτησης ή για την προετοιμασία μιας κρίσης.

Η αποθήκευση σε σπήλαια είναι η πιο ακριβή από τις επιλογές, αλλά και η πιο κατάλληλη για την αποθήκευση υδρογόνου. Η επιχειρησιακή εμπειρία από την αποθήκευση υδρογόνου σε σπήλαια περιορίζεται επί του παρόντος σε λίγες τοποθεσίες στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ. Οι πιο συνηθισμένες από αυτές είναι οι εξαντλημένες υπόγειες αποθήκες φυσικού αερίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως δεξαμενές υδρογόνου για το πλεόνασμα ανανεώσιμης ενέργειας.



Δίκτυο φυσικού αερίου Αποθήκευση υδρογόνου

Ως εναλλακτική λύση για την υπόγεια αποθήκευση σε σπήλαια, το πλεόνασμα υδρογόνου μπορεί να διοχετευθεί στο δημόσιο δίκτυο φυσικού αερίου για τη δημιουργία εμπλουτισμένου με υδρογόνο φυσικού αερίου (HENG).

Το εμπλουτισμένο με υδρογόνο αστικό αέριο ή αέριο κοκ, με περιεκτικότητα σε υδρογόνο άνω του 50% όγκου, διανεμήθηκε σε σπίτια στη Γερμανία, τις ΗΠΑ και τη Βρετανία μέσω αγωγών φυσικού αερίου μέχρι τον 20ό αιώνα. Η υποδομή που χρησιμοποιήθηκε τότε εξακολουθεί να υπάρχει, αν και αργότερα τροποποιήθηκε για να μεταφέρει φυσικό αέριο.

Ενώ είναι γενικά αποδεκτό ότι αέριο με περιεκτικότητα σε υδρογόνο 10% θα μπορούσε να εισαχθεί στο υπάρχον σύστημα φυσικού αερίου χωρίς να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στους τελικούς χρήστες ή στην υποδομή των αγωγών, ορισμένα κρίσιμα εξαρτήματα έχουν κριθεί ακατάλληλα για χρήση σε αυτά τα επίπεδα συγκέντρωσης υδρογόνου.

Παρά το μειονέκτημα αυτό, πιστεύεται ότι μεγάλες ποσότητες αερίου υδρογόνου θα μπορούσαν να αποθηκευτούν με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιώντας μεγάλο μέρος των υφιστάμενων δικτύων φυσικού αερίου στις βιομηχανικές χώρες και στη συνέχεια να μετατραπούν άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 2 Προετοιμασία για το χειρισμό αέριου υδρογόνου

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΥ

- Εκπαίδευση χειρισμού υδρογόνου. Το προσωπικό που χειρίζεται υδρογόνο ή σχεδιάζει εξοπλισμό για συστήματα υδρογόνου πρέπει να εξοικειωθεί με τις φυσικές, χημικές και ειδικές επικίνδυνες ιδιότητες των GH₂, LH₂ και SLH₂. Η εκπαίδευση πρέπει να περιλαμβάνει λεπτομερή προγράμματα ασφαλείας που αναγνωρίζουν τις ανθρώπινες δυνατότητες και τους περιορισμούς. Στόχος του προγράμματος ασφαλείας είναι η εξάλειψη των ατυχημάτων και η ελαχιστοποίηση της σοβαρότητας των ατυχημάτων που συμβαίνουν.
- Εκπαίδευση σχεδιαστών. Το προσωπικό που ασχολείται με το σχεδιασμό του εξοπλισμού και το σχεδιασμό των λειτουργιών πρέπει να εκπαιδεύεται ώστε να τηρεί προσεκτικά τα αποδεκτά πρότυπα και τις κατευθυντήριες γραμμές και να συμμορφώνεται με τους κανονιστικούς κώδικες.
- Πιστοποίηση χειριστών. Οι χειριστές πρέπει να είναι πιστοποιημένοι για το χειρισμό GH₂, LH₂ και SLH₂, ανάλογα με την περίπτωση, και στις διαδικασίες έκτακτης ανάγκης για διαρροές και διαρροές. Οι χειριστές πρέπει να ενημερώνονται για τυχόν αλλαγές στις διαδικασίες ασφαλείας και στις λειτουργίες της εγκατάστασης.
- Πρόγραμμα επικοινωνίας κινδύνων - αναπτύσσουν, εφαρμόζουν και διατηρούν στο χώρο εργασίας ένα γραπτό πρόγραμμα επικοινωνίας κινδύνων για τους χώρους εργασίας τους.
- Ετήσια αναθεώρηση. Κάθε εγκατάσταση θα επανεξετάζει ετησίως όλες τις εργασίες που εκτελούνται στην εγκατάσταση για να διασφαλίσει ότι το πρόγραμμα εκπαίδευσης σε θέματα ασφάλειας λειτουργεί αποτελεσματικά και για να εντοπίσει και να εντάξει στο πρόγραμμα όλες τις δυνητικά επικίνδυνες εργασίες, εκτός από τις εργασίες που έχουν χαρακτηριστεί υποχρεωτικές. Οι επιτροπές ασφάλειας των εργαζομένων, οι εκπρόσωποι των εργαζομένων και άλλες ενδιαφερόμενες ομάδες θα πρέπει να έχουν την ευκαιρία να βοηθήσουν στη διαδικασία προσδιορισμού.

Χρήση εγγενών χαρακτηριστικών ασφαλείας

Ανεξάρτητα από την ποσότητα, όλα τα συστήματα και οι λειτουργίες υδρογόνου πρέπει να είναι απαλλαγμένα από κινδύνους, παρέχοντας επαρκή εξαερισμό, σχεδιάζοντας και λειτουργώντας έτσι ώστε να αποφεύγονται οι διαρροές και εξαλείφοντας τις πιθανές πηγές ανάφλεξης. Περαιτέρω, θα πρέπει να προβλέπονται εμπόδια ή μέτρα ασφαλείας για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων και τον έλεγχο των αστοχιών.

Συστήματα ασφαλείας

Θα πρέπει να εγκατασταθούν συστήματα ασφαλείας για την ανίχνευση και την αντιμετώπιση ή τον έλεγχο των πιθανών επιπτώσεων κινδύνων όπως αστοχίες δοχείων, διαρροές και διαρροές, ευθραυστότητα, συγκρούσεις κατά τη μεταφορά, αστοχίες συστημάτων εξάτμισης, αναφλέξεις, πυρκαγιές και εκρήξεις, διασπορά νεφών και έκθεση του προσωπικού σε κρυογονικές θερμοκρασίες ή θερμοκρασίες φλόγας.

Ασφαλής διεπαφή

- Μια ασφαλής διασύνδεση πρέπει να διατηρείται σε κανονικές συνθήκες και σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης, ώστε να συμβαίνουν τουλάχιστον δύο βλάβες πριν από επικίνδυνα συμβάντα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε τραυματισμό ατόμων, απώλεια ζωής ή σημαντικές ζημιές στον εξοπλισμό ή σε περιουσιακά στοιχεία.
- Θα πρέπει να εγκατασταθούν συστήματα προειδοποίησης για την ανίχνευση μη φυσιολογικών συνθηκών, τη μέτρηση δυσλειτουργιών και την ένδειξη αρχόμενων βλαβών. Η μετάδοση δεδομένων του συστήματος προειδοποίησης με ορατά και ηχητικά σήματα θα πρέπει να έχει επαρκή πλεονασμό ώστε να αποτρέπεται η απενεργοποίηση του συστήματος από οποιαδήποτε αστοχία ενός σημείου.
- Έλεγχοι ροής. Θα πρέπει να εγκατασταθούν βαλβίδες ασφαλείας και ρυθμίσεις ροής ώστε να ανταποκρίνονται επαρκώς στην προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού κατά την αποθήκευση, το χειρισμό και τη χρήση υδρογόνου.
- Χαρακτηριστικά ασφαλείας - Τα χαρακτηριστικά ασφαλείας του συστήματος και του εξοπλισμού θα πρέπει να εγκαθίστανται για τον αυτόματο έλεγχο του εξοπλισμού που απαιτείται για τη μείωση των κινδύνων που υποδεικνύονται από την ενεργοποίηση των συστημάτων προειδοποίησης και προειδοποίησης. Οι χειροκίνητοι έλεγχοι εντός των συστημάτων θα πρέπει να περιορίζονται από αυτόματες διατάξεις περιορισμού για την αποφυγή υπερβάσεων.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ENANTI ΑΣΤΟΧΙΑΣ

- Πιστοποίηση. Ο εξοπλισμός, η ισχύς και οι άλλες υπηρεσίες του συστήματος πρέπει να επαληθεύονται για την ασφαλή απόδοση στο σχεδιασμό και σε κανονικά λειτουργικά καθεστώτα μέσω πιστοποίησης.
- Ασφαλής σχεδιασμός. Οποιαδήποτε αστοχία από την οποία προκύπτουν δυνητικά επικίνδυνες συνθήκες πρέπει να προκαλεί την επαναφορά του συστήματος σε συνθήκες που είναι ασφαλέστερες για το προσωπικό και με το μικρότερο δυναμικό υλικών ζημιών.



- Επαναληπτική ασφάλεια. Τα πλεονάζοντα χαρακτηριστικά ασφαλείας πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να αποτρέπουν επικίνδυνες καταστάσεις όταν ένα εξάρτημα αστοχεί.

Ανασκόπηση ασφαλείας

Όλα τα σχέδια και οι λειτουργίες που σχετίζονται με τη χρήση υδρογόνου πρέπει να υπόκεινται σε ανεξάρτητη επανεξέταση ασφαλείας.

- Οι αναθεωρήσεις ασφαλείας θα πρέπει να διεξάγονται για τις επιπτώσεις των ιδιοτήτων του ρευστού, την εκπαίδευση, τη διαφυγή και τη διάσωση, την ανίχνευση πυρκαγιάς και την πυρόσβεση.
- Διαδικασίες λειτουργίας. Πρέπει να καθιερωθούν και να αναθεωρηθούν, κατά περίπτωση, διαδικασίες λειτουργίας για κανονικές συνθήκες και συνθήκες έκτακτης ανάγκης.
- Ανάλυση κινδύνων. Πρέπει να διενεργούνται αναλύσεις κινδύνων για τον εντοπισμό συνθηκών που ενδέχεται να προκαλέσουν τραυματισμό, θάνατο ή υλικές ζημιές.
- Αναφορά ατυχημάτων. Η αναφορά, η διερεύνηση και η τεκμηρίωση των συμβάντων, των αιτιών και των απαιτούμενων διορθωτικών ενεργειών για ατυχήματα, συμβάντα, αποτυχιές δοκιμών και αποτυχιές αποστολών πρέπει να ακολουθούν τις καθιερωμένες διαδικασίες και κατευθυντήριες γραμμές βασικής πολιτικής.

Ασφαλής εργασία με αέρια και ψυκτικά μέσα

Σχετικά πρότυπα ασφαλείας και νομοθεσία στην ΕΕ Ένα πρότυπο είναι ένα έγγραφο που καθορίζει σημαντικές απαιτήσεις για ένα συγκεκριμένο σύστημα, προϊόν ή διαδικασία. Τα πρότυπα αποσκοπούν στη μείωση του κόστους, την αύξηση της απόδοσης και τη βελτίωση της ασφάλειας. Τα πρότυπα αναπτύσσονται μέσω μιας διαδικασίας ανταλλαγής γνώσεων και οικοδόμησης συναίνεσης μεταξύ τεχνικών εμπειρογνομόνων. Συνήθως είναι εθελοντικά. Ωστόσο, πρόσθετοι νόμοι και κανονισμοί μπορεί να αναφέρονται σε πρότυπα και, ως εκ τούτου, να καθιστούν τη συμμόρφωση με αυτά υποχρεωτική.

Legislation	Year	Title	Scope	Relevant harmonised standards*
Directive 94/9/EC ⁵	1994	ATEX 'Equipment' Directive: equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres	- equipment (both electrical and mechanical) being used in potentially explosive atmospheres - defines product categories and characteristics products must meet in order to be installed in potentially explosive atmospheres - dedicated to manufacturers and distributors	EN 1127-1 EN 13463-1, -5, -6 EN 14797 EN 14986 EN 15198 EN 15233 EN 60079-0, -15, -20-1
Directive 2014/34/EU ⁶	2014	Recast to react on Regulation (EU) No. 765/2008, entering into force Apr 20, 2016		
Directive 97/23/EC ⁷	1997	Pressure Equipment Directive (PED)	- pressure equipment and assemblies with internal pressure higher than 0.5 bar - harmonisation of national law regarding design, manufacture and conformity assessment of pressure equipment - more restrictive in regard with flammable refrigerants	EN 378-2 EN ISO 4126 EN 12178 EN 12263 EN 12284 EN 13136 EN 14276-1, -2
Directive 1999/34/EC ⁸	1999	Product Liability Directive	- liability of defective products	
Directive 1999/92/EC ⁹	1999	ATEX 'Workplace' Directive: occupational health and safety in potentially explosive atmospheres	- protection for workers in potentially explosive atmospheres - classification of working areas where explosive atmospheres exist into zones - dedicated to machine owners	
Directive 2006/95/EC ¹⁰	2006	Low Voltage Directive (LVD)	- applying to any 'electrical equipment' designed for use with a voltage rating of between 50 and 1,000 V for A/C and between 75 and 1,500 V for D/C	EN 60204 EN 60335-1, -2-24, -2-34, -2-40
Directive 2006/42/EC ¹¹	2006	Machinery Safety Directive (MSD)	- machinery and similar equipment, safety components - risk reduction through integration of safety into design, production, maintenance, dismantling etc. of machines	EN 378-2 EN 1012 EN 1127-2 EN 60204-1 EN 60335-1,-2-40

Source: <http://www.newapproach.org/Directives/DirectiveList.asp>

Διάφορα πρότυπα αφορούν τεχνικές πτυχές του εξοπλισμού RAC. Ορισμένα περιλαμβάνουν επίσης περιβαλλοντικές απαιτήσεις (π.χ. EN 378). Η αυξανόμενη χρήση τεχνολογιών που σχετίζονται με φυσικά ψυκτικά μέσα οδήγησε συνεχώς στην ανάπτυξη σχετικών προτύπων τα τελευταία χρόνια. Τα περισσότερα πρότυπα είναι ανεξάρτητα από το ψυκτικό μέσο, ωστόσο ορισμένα καθορίζουν κανόνες σχετικά με συγκεκριμένα ψυκτικά μέσα.

Όσον αφορά την ασφάλεια, τα πρότυπα μπορεί να περιλαμβάνουν τα εξής:

- Ταξινόμηση ασφαλείας των ψυκτικών μέσων (αναφλεξιμότητα, τοξικότητα).
- Τύποι χρήσης, όρια μεγέθους φορτίου ψυκτικού μέσου και μεγέθη χώρων.
- Ασφαλής σχεδιασμός και
- Δοκιμές των εξαρτημάτων και των σωληνώσεων (π.χ. πιέσεις),
- Δοκιμές συγκροτημάτων (συστημάτων).
- Ηλεκτρική ασφάλεια, πηγές ανάφλεξης.



- Χώροι εγκατάστασης, τοποθέτηση, σωληνώσεις, μηχανικός εξαερισμός, ανίχνευση αερίων.
- Οδηγίες, εγχειρίδια, πινακίδες ονομασίας.
- Συντήρηση, συντήρηση και πρακτικές χειρισμού της ψύξης. Οι σημαντικότερες από αυτές τις πτυχές επισημαίνονται λεπτομερώς στις ακόλουθες ενότητες.

Εργασία με εύφλεκτα ψυκτικά μέσα

Όταν εργάζεστε με εύφλεκτα ψυκτικά μέσα, πρέπει να καθιερωθούν σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και πρακτικές λειτουργίες για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων. Απαιτείται γνώση των ιδιοτήτων των διαφόρων ψυκτικών μέσων. Η ευαισθητοποίηση σχετικά με τις πρακτικές ασφαλούς χειρισμού και αποθήκευσης εύφλεκτων ψυκτικών μέσων και ο κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος είναι μέτρα που μπορούν να αποτρέψουν πιθανά ατυχήματα. Πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις για την αποτροπή της εμφάνισης διαρροών και την αποφυγή επικίνδυνου βαθμού απελευθερωμένου ψυκτικού μέσου. Στην περίπτωση εύφλεκτων ψυκτικών μέσων, πρέπει να εξαλείφονται οι πιθανές πηγές ανάφλεξης.



Εργασία με εύφλεκτα ψυκτικά μέσα

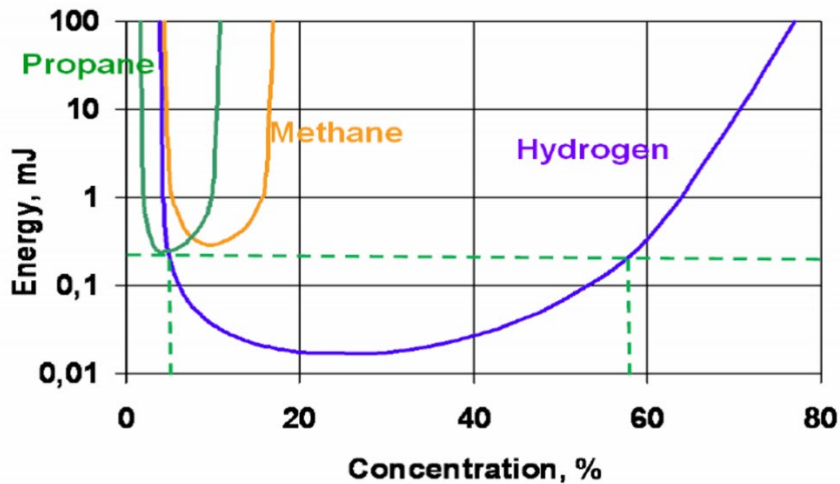
Όταν εργάζεστε με εύφλεκτα ψυκτικά μέσα, πρέπει να καθιερωθούν σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και πρακτικές λειτουργίας για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων. Απαιτείται γνώση των ιδιοτήτων των διαφόρων ψυκτικών μέσων. Η ευαισθητοποίηση σχετικά με τις πρακτικές ασφαλούς χειρισμού και αποθήκευσης εύφλεκτων ψυκτικών μέσων και ο κατάλληλος σχεδιασμός του συστήματος είναι μέτρα που μπορούν να αποτρέψουν πιθανά ατυχήματα. Πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις για την αποτροπή της εμφάνισης διαρροών και την αποφυγή επικίνδυνου βαθμού απελευθερωμένου ψυκτικού μέσου. Στην περίπτωση εύφλεκτων ψυκτικών μέσων, πρέπει να εξαλείφονται οι πιθανές πηγές ανάφλεξης.

Συνδυασμένοι κίνδυνοι υδρογόνου και οξυγόνου

Για να κατανοήσουμε και να μετριάσουμε τους κινδύνους των συστημάτων ηλεκτρόλυσης, πρέπει να εξετάσουμε τους εγγενείς κινδύνους του υδρογόνου. Το υδρογόνο είναι εύκολα καύσιμο. Έχει ένα από τα ευρύτερα εύρη ευφλεκτότητας από οποιοδήποτε καύσιμο και αναφλέγεται σε συγκέντρωση μεταξύ 4% και 75% στον αέρα. Είναι πολύ πιο εύκολο να δημιουργηθεί ένα εύφλεκτο μείγμα υδρογόνου σε σύγκριση με άλλα καύσιμα όπως το προπάνιο, το οποίο αναφλέγεται μόνο σε συγκέντρωση 2-10% στον αέρα.

Το υδρογόνο έχει επίσης εξαιρετικά χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης, πράγμα που σημαίνει ότι χρειάζεται ελάχιστη προσπάθεια για να ξεκινήσει μια αντίδραση καύσης. Το υδρογόνο χρειάζεται μόλις 0,02 mJ ενέργειας για να αναφλεγεί στον αέρα, καθιστώντας την ανάφλεξή του 14,5 φορές ευκολότερη από το προπάνιο, το οποίο απαιτεί τουλάχιστον 0,29 mJ. Τα συστήματα ηλεκτρόλυσης έχουν πολλά Εξισορρόπηση των φυτικών εξαρτημάτων και διεργασιών που θα μπορούσαν εύκολα να γίνουν πηγές ανάφλεξης.

Εάν αναμειχθούν H₂ και O₂ ακούσια, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι θανατηφόρα. Σε καθαρό οξυγόνο, το υδρογόνο αναφλέγεται ακόμη πιο εύκολα και θα καεί με σημαντικά περισσότερη ενέργεια. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις οξυγόνου αυξάνουν επίσης τη σοβαρότητα μιας ενεργειακής έκρηξης, η οποία απελευθερώνει μια έκρηξη ενέργειας μέσω ενός κύματος πίεσης.



Σχήμα 5 Γράφημα που απεικονίζει το ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων καύσιμης ύλης και τη χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης που απαιτείται για το υδρογόνο σε σύγκριση με το προπάνιο και το μεθάνιο - Η εικόνα προσφέρθηκε από Hy Response

Οι κίνδυνοι και τα πλεονεκτήματα των συστημάτων ηλεκτρόλυσης

Οι ηλεκτρολύτες είναι δύσκολοι επειδή, λόγω λειτουργίας, το υδρογόνο βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από φορτία υψηλού ηλεκτρικού ρεύματος. Συνήθως, τα ηλεκτρικά εξαρτήματα πρέπει να είναι "ηλεκτρικά ταξινομημένα" για ασφαλή χρήση γύρω από το υδρογόνο, όταν υπάρχει πιθανότητα διαρροής. Ωστόσο, δεν είναι δυνατή η ηλεκτρική ταξινόμηση ενός ηλεκτρολύτη. Η καμινάδα είναι πάντα μια πιθανή πηγή ανάφλεξης, εάν σχηματιστεί μείγμα εύφλεκτων αερίων κατά τη λειτουργία. Ευτυχώς, τα συστήματα ηλεκτρόλυσης έχουν επίσης τα πλεονεκτήματά τους. Διάφοροι εγγενείς παράγοντες σχεδιασμού συμβάλλουν στον μετριασμό του κινδύνου ανάφλεξης.

Πολλές εφαρμογές ηλεκτρόλυσης θέτουν το H₂ τους σε λειτουργία αμέσως. Αυτό σημαίνει ότι είναι διαθέσιμο περιορισμένο καύσιμο πέραν της μικρής ποσότητας στις γραμμές της διεργασίας εξόδου. Μόλις διακοπεί η παροχή ρεύματος, η παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου σταματά γρήγορα. Δεδομένου ότι υπάρχει περιορισμένο αποθηκευμένο H₂ και η παραγωγή μπορεί να σταματήσει γρήγορα, υπάρχει μικρότερος κίνδυνος σχηματισμού εύφλεκτου μίγματος.

Επιπλέον, πολλά συστήματα ηλεκτρόλυσης εκτονώνουν το οξυγόνο τους στον αέρα σε πίεση περιβάλλοντος. Ο αέρας του περιβάλλοντος είναι ένας πολύ λιγότερο επικίνδυνος οξειδωτής από το καθαρό, υπό πίεση οξυγόνο.

Τέλος, στις περισσότερες εφαρμογές, ο μηχανικός εξαερισμός γύρω από την καμινάδα του ηλεκτρολύτη και την ισορροπία των λειτουργιών της εγκατάστασης θα απομακρύνει τυχόν μικρές διαρροές υδρογόνου πριν φτάσουν σε συγκεντρώσεις καύσιμου μίγματος. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να αποτρέψουν ένα συμβάν καύσης, μη αφήνοντας ποτέ να σχηματιστεί ένα εύφλεκτο μείγμα εξ αρχής.

Ενσωματώσεις συστημάτων

Ο εξοπλισμός ηλεκτρόλυσης ενέχει εγγενείς κινδύνους που βασίζονται στην ενσωμάτωση του συστήματος. Ένας ηλεκτρολύτης μπορεί να έχει σχεδιαστεί με ασφάλεια από τον κατασκευαστή, αλλά τι συμβαίνει όταν εγκαθίσταται σε διάφορες εφαρμογές ή τροφοδοτείται από μοναδικές ηλεκτρικές συσκευές; Θα εξακολουθήσουν να λειτουργούν σωστά οι εξαεριστήρες και τα μέτρα ασφαλείας;

Ένας παράγοντας που συνέβαλε στο περιστατικό με τον κορεατικό ηλεκτρολύτη (που αναφέρθηκε παραπάνω) ήταν πιθανότατα η χρήση της συσκευής εκτός των ορίων σχεδιασμού του κατασκευαστή. Επειδή το σύστημα αλκαλικού νερού δεν λειτουργούσε στα κατάλληλα επίπεδα ισχύος, η υποβάθμιση της μεμβράνης των κυττάρων επέτρεψε τη διείσδυση οξυγόνου στην πλευρά υδρογόνου του ηλεκτρολύτη. Ακόμη και αυτό το σχετικά απλό λειτουργικό λάθος είχε σημαντικές συνέπειες.

Στρατηγικές ασφάλειας του συστήματος ηλεκτρολύτη

Πώς μπορούν οι σχεδιαστές και οι χρήστες συστημάτων ηλεκτρόλυσης να αποφύγουν τις ενεργειακές συνέπειες της καύσης; Μια κοινή προσέγγιση για την ασφάλεια της ηλεκτρόλυσης ξεκινά με το τρίγωνο της φωτιάς, μια απλή απεικόνιση που περιλαμβάνει τρεις παράγοντες που είναι απαραίτητοι για την καύση:

- **καύσιμο**
- **πηγή ανάφλεξης και**
- **οξειδωτής.**



Η εξάλειψη της μίας μόνο πλευράς του τριγώνου θα αποτρέψει την καύση. Το καύσιμο είναι το υδρογόνο και ο οξειδωτής είναι το οξυγόνο - είτε στον αέρα του περιβάλλοντος (21% O₂) είτε σε καθαρό οξυγόνο. Ο στόχος είναι να προβλεφθούν οι πηγές ανάφλεξης, αλλά επειδή η απαιτούμενη ενέργεια ανάφλεξης είναι τόσο χαμηλή, δεν μπορεί λογικά να αποκλειστούν. Ακόμη και ένας μικρός στατικός σπινθήρας είναι αρκετός για την καύση.

Η πρώτη άμυνα είναι να κρατήσετε το υδρογόνο μακριά από τον οξειδωτή - αποφεύγοντας την ακούσια ανάμιξη.

Έτσι, εξετάζοντας αρχικά τους πιθανούς τρόπους αστοχίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης που μπορούν να δημιουργήσουν ακούσια ανάμιξη. Στη συνέχεια, διερευνά στρατηγικές μετριασμού, όπως:

- **Πρόληψη διαρροών:** Αποτρέψτε τις εξωτερικές διαρροές από την ανάμιξη υδρογόνου με τον αέρα του περιβάλλοντος και αποτρέψτε τις εσωτερικές διαρροές από το ένα μέρος του συστήματος στο άλλο.
- **Εξαερισμός:** Εγκαταστήστε μηχανικούς ανεμιστήρες εξαερισμού για τον καθαρισμό του περιβλήματος του ηλεκτρολύτη και τη μείωση της συσσώρευσης υδρογόνου.
- **Εξαερισμός και απόρριψη:** Αξιολογήστε τις συγκεντρώσεις για όλες τις λειτουργικές καταστάσεις και δημιουργήστε διαδικασίες για τον εξαερισμό του O₂ και του H₂ κατά την έναρξη λειτουργίας, τη λειτουργία και τον τερματισμό λειτουργίας του συστήματος.
- **Καθαρισμός:** Καθαρισμός των συστημάτων H₂ με άζωτο ή άλλα αδρανή αέρια πριν και μετά τη χρήση (προαιρετικά).
- **Ανίχνευση:** Χρησιμοποιήστε προσωπικές οθόνες, ανιχνευτές διαρροών, κάμερες απεικόνισης και σταθερά H₂ Ενσωματώστε την ανίχνευση στις διαδικασίες και στους αυτοματοποιημένους ελέγχους ασφαλείας.
- **Σχεδιασμός ασφάλειας:** Παρέχετε τακτική εκπαίδευση σε όλο το προσωπικό που εργάζεται γύρω από συστήματα υδρογόνου ή ηλεκτρόλυσης. Ανάπτυξη σαφών σχεδίων για τη συντήρηση, τη λειτουργία και τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Τεχνολογία ανίχνευσης αερίου υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι ένα άοσμο, άχρωμο και άγευστο αέριο. Ως εκ τούτου, η βιομηχανία βασίζεται σε ανιχνευτές αερίου υδρογόνου για την ανίχνευση διαρροών. Η IGD διαθέτει δύο τεχνολογίες κατάλληλες για την ανίχνευση υδρογόνου: αισθητήρες σφαιριδίων και ηλεκτροχημικούς αισθητήρες.

Αισθητήρες Pellistor

Οι αισθητήρες Pellistor, ή καταλυτικές χάντρες, βασίζονται στη χρήση ενός καταλύτη που προκαλεί την ανάφλεξη εύφλεκτου αερίου εντός του αισθητήρα σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από τη συνήθη. Όταν συμβαίνει η καύση, παράγεται θερμότητα ανάλογα με την ποσότητα του εύφλεκτου αερίου που υπάρχει. Η συγκέντρωση των εύφλεκτων αερίων μπορεί στη συνέχεια να προκύψει από αυτή τη μέτρηση και να εκφραστεί ως ποσοστό του κατώτερου εκρηκτικού ορίου





Απεικονίζεται: TOC-750 ανιχνευτής αερίου ασφαλούς περιοχής με δυνατότητα διευθυνοδότησης

Οι αισθητήρες Pellistor χρησιμοποιούνται συνήθως ως μια γενική τεχνολογία για την ανίχνευση εύφλεκτων αερίων. Οι αισθητήρες pellistor ανταποκρίνονται σε οποιοδήποτε εύφλεκτο αέριο, μετρώντας 0-100% LEL (κατώτερο όριο εκρηκτικότητας - είναι η καθορισμένη ελάχιστη συγκέντρωση αερίων και ατμών που αιωρούνται στον αέρα που επιτρέπει την ανάφλεξη παρουσία πηγής ενέργειας). Δεδομένου ότι μια συγκέντρωση υδρογόνου 4% είναι εκρηκτική, αυτό αντιστοιχεί σε 100% LEL.

Ηλεκτροχημική

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες λειτουργούν με την αντίδραση του αερίου-στόχου -στην προκειμένη περίπτωση του υδρογόνου- με έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος παράγει ρεύμα ανάλογο με την ποσότητα του αερίου που υπάρχει. Αυτό επιτρέπει την πολύ πιο ευαίσθητη ανίχνευση αερίου υδρογόνου σε σύγκριση με τους αισθητήρες pellistor. Για παράδειγμα, 25% LEL ισοδυναμεί με 1% συγκέντρωση υδρογόνου ή 10.000 ppm. Οι ηλεκτροχημικοί ανιχνευτές αερίων IGD προσφέρουν ευαισθησία στις περιοχές από 0-1000 ppm έως 0-40.000ppm. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτής της ακραίας ευαισθησίας είναι ότι οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες μπορούν να καταστραφούν κατά την έκθεση σε επίπεδα που υπερβαίνουν το εύρος μέτρησής τους, απαιτώντας την αντικατάστασή τους. Οι ηλεκτροχημικοί ανιχνευτές υδρογόνου IGD είναι ιδανικοί για εφαρμογές όπου η ανίχνευση υδρογόνου σε χαμηλά επίπεδα είναι κρίσιμη.

Άλλες τεχνολογίες ανίχνευσης

Υπάρχουν διάφορες άλλες τεχνολογίες ανίχνευσης αερίων- ωστόσο, αυτές δεν συνιστώνται για την ανίχνευση υδρογόνου.

- Οι αισθητήρες **υπερύθρων** δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσουν το υδρογόνο, καθώς διατομικά μόρια όπως το υδρογόνο δεν απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία.
- Οι **ανιχνευτές αερίων ημιαγωγών** μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση του υδρογόνου- ωστόσο, αυτοί οι αισθητήρες ανταποκρίνονται συνήθως και σε ένα ευρύ φάσμα άλλων αερίων και ατμών. Η πιθανότητα ψευδών συναγερμών σημαίνει ότι οι αισθητήρες ημιαγωγών δεν συνιστώνται για αυτές τις εφαρμογές.
- Η **θερμική αγωγιμότητα** είναι μια άλλη βιώσιμη τεχνολογία, αν και η χαμηλή ευαισθησία και επιλεκτικότητα τους καθιστούν ανεπαρκείς για εφαρμογές ανίχνευσης υδρογόνου.

Φορητοί ανιχνευτές αερίου υδρογόνου

Τέλος, υπάρχουν φορητοί ανιχνευτές υδρογόνου για πρόσθετη προσωπική ασφάλεια και εντοπισμό διαρροών. Αυτοί μπορούν να είναι είτε ως ένας απλός μετρητής αερίων σε 0-1000ppm για να βοηθήσουν στον εντοπισμό διαρροών στον εξοπλισμό. Εναλλακτικά, υπάρχει μια ποικιλία οργάνων παρακολούθησης αερίων για εργασίες σε κλειστούς χώρους.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ 3 Εκτέλεση άσκησης εκτίμησης κινδύνου σε περιβάλλον υδρογόνου.

Τι είναι η αξιολόγηση κινδύνου;

Η εκτίμηση κινδύνου είναι απλώς μια προσεκτική εξέταση του τι θα μπορούσε να προκαλέσει βλάβη στους ανθρώπους στη δουλειά σας, έτσι ώστε να μπορείτε να σταθμίσετε αν έχετε λάβει αρκετές προφυλάξεις ή αν πρέπει να κάνετε περισσότερα για να αποτρέψετε τη βλάβη. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι κανείς δεν θα τραυματιστεί ή δεν θα αρρωστήσει, καθώς τα ατυχήματα και οι ασθένειες μπορούν να καταστρέψουν ζωές και να επηρεάσουν την επιχείρησή σας, εάν χαθεί η παραγωγή, καταστραφούν τα μηχανήματα, αυξηθεί το κόστος ασφάλισης ή καταλήξει σε δικαστήριο. Είστε νομικά υποχρεωμένοι να αξιολογείτε τους κινδύνους που υπάρχουν στο χώρο εργασίας σας. Ορισμένες εκτιμήσεις της σχέσης μεταξύ κινδύνου και επικινδυνότητας είναι πολύ ακριβείς και βασίζονται σε αριθμητικές αναθέσεις τιμών που υπολογίζονται από λεπτομερείς εκτιμήσεις της μηχανικής και άλλων κλάδων.



Τα σημαντικά πράγματα που πρέπει να αποφασίσετε είναι αν ένας κίνδυνος είναι σημαντικός και αν τον έχετε καλύψει με ικανοποιητικές προφυλάξεις για να διασφαλίσετε την ελαχιστοποίηση του κινδύνου. Αυτό πρέπει να ελέγχεται όταν αξιολογείτε τους κινδύνους. Για παράδειγμα, ο ηλεκτρισμός μπορεί να σκοτώσει, αλλά ο κίνδυνος να το κάνει αυτό σε ένα περιβάλλον γραφείου είναι απίθανος, υπό την προϋπόθεση ότι τα "ηλεκτροφόρα" εξαρτήματα είναι μονωμένα και τα μεταλλικά περιβλήματα κατάλληλα γειωμένα.

Προσέγγιση 5 βημάτων για τον εντοπισμό των κινδύνων και την εκτίμηση των κινδύνων

Βήμα 1: Αναζητήστε τους κινδύνους

Περιηγηθείτε στο χώρο εργασίας σας και αναζητήστε ό,τι θα μπορούσε εύλογα να αναμένεται να προκαλέσει βλάβη, όχι τα ασήμαντα πράγματα αλλά επικεντρωθείτε στους σημαντικούς κινδύνους. Ρωτήστε επίσης τους υπαλλήλους σας τι πιστεύουν και αν έχουν παρατηρήσει κάτι που μπορεί να μην είναι άμεσα εμφανές.

Βήμα 2: Αποφασίστε ποιος θα μπορούσε να υποστεί βλάβη και πώς

Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει νέους εργαζόμενους, εκπαιδευόμενους, μη κατάλληλους για τη γλώσσα, καθαριστές, επισκέπτες, εργολάβους, εργαζόμενους συντήρησης, μέλη του κοινού ή ανθρώπους με τους οποίους μοιράζεστε τον χώρο εργασίας σας.

Βήμα 3: Αξιολογήστε τους κινδύνους και αποφασίστε αν οι τρέχουσες προφυλάξεις είναι επαρκείς ή χρειάζονται βελτίωση.

Όταν εξετάζετε αν οι τρέχουσες προφυλάξεις είναι επαρκείς, εξετάστε επίσης αν ο εναπομείνας κίνδυνος είναι ανεκτός ή μη ανεκτός. Εάν είναι μη ανεκτός, τότε πρέπει να επανεκτιμήσετε τις προφυλάξεις και να τις βελτιώσετε έως ότου ελαχιστοποιηθεί ο εναπομείνας κίνδυνος. Ο πραγματικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου και για να το επιτύχετε αυτό μπορεί να χρειαστεί να προσθέσετε περαιτέρω προφυλάξεις.

Βήμα 4: Καταγράψτε τα ευρήματά σας

Εάν έχετε περισσότερους από πέντε εργαζόμενους, πρέπει να καταγράψετε τα "σημαντικά ευρήματα" της αξιολόγησής σας, δηλαδή να καταγράψετε τους σημαντικούς κινδύνους και τα συμπεράσματα.



Ένα παράδειγμα μπορεί να είναι: Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις: η μόνωση και η γείωση ελέγχονται τακτικά και λειτουργούν όπως προβλέπεται. Οι εργαζόμενοι πρέπει επίσης να ενημερωθούν για αυτά τα συμπεράσματα.

Βήμα 5: Επανεξετάστε την αξιολόγησή σας και αναθεωρήστε την εάν είναι απαραίτητο

Η επιχείρησή σας αναπόφευκτα θα εξελισσεται και καθώς εισάγονται νέος εξοπλισμός και νέες διαδικασίες, θα προκύψουν και νέοι κίνδυνοι. Όταν έχει γίνει μια σημαντική αλλαγή, επικαιροποιήστε την εκτίμηση κινδύνου όπως απαιτείται. Μην το κάνετε αυτό για κάθε ασήμαντη αλλαγή.

Σε γενικές γραμμές, εάν υπάρχει ελάχιστη γνώση και κατανόηση των κινδύνων και των συνιστωσών των κινδύνων που συνδέονται με τη χρήση μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας, ο ασφαλής σχεδιασμός, η χρήση και η λειτουργία του εξοπλισμού θα συνδέεται με πολλές αβεβαιότητες. Αυτό οδηγεί σε μια πιο επικίνδυνη κατάσταση. Ωστόσο, εάν οι εμπλεκόμενοι αποκτήσουν μεγαλύτερη γνώση και κατανόηση του θέματος, τότε θα επιτευχθεί πολύ υψηλότερο επίπεδο βεβαιότητας στον ασφαλή σχεδιασμό, χρήση και λειτουργία. Αυτό οδηγεί τελικά σε μειωμένο επίπεδο κινδύνου

Για την περίπτωση των εύφλεκτων ψυκτικών μέσων, μια τέτοια αξιολόγηση πρέπει να περιλαμβάνει:

- Επικίνδυνες ιδιότητες της ουσίας.
- Κίνδυνος έκθεσης ατόμων.
- ρομποτική ικανότητα εμφάνισης και διατήρησης εκρηκτικής ατμόσφαιρας.
- Πιθανότητα ύπαρξης και ενεργοποίησης πηγών ανάφλεξης.
- Απαραίτητη δράση σε περίπτωση πυρκαγιάς ή έκρηξης και ο βαθμός των αναμενόμενων επιπτώσεων.
- Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες μέθοδοι για την εκτίμηση του κινδύνου, καθώς και πρότυπα που μπορεί να έχουν άμεση ή ευρεία εφαρμογή στην εξεταζόμενη κατάσταση ή εξοπλισμό.

Προσωρινή εύφλεκτη ζώνη και ασφαλής χώρος εργασίας Ορισμένες θέσεις πρέπει να επισημαίνονται ως "προσωρινή εύφλεκτη ζώνη" όταν εργάζονται σε συστήματα με εύφλεκτα ψυκτικά μέσα. Αυτή η προσωρινή ζώνη πρέπει να κυμαίνεται από ακτίνα περίπου μισού μέτρου από το σύστημα έως απόσταση κατάλληλη σε σχέση με τη μέγιστη ποσότητα ψυκτικού που θα μπορούσε να απελευθερωθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εργασίας. Η "ασφαλής ζώνη εργασίας" αρχίζει σε απόσταση τριών μέτρων από το σύστημα. Σε ακτίνα δύο μέτρων δεν πρέπει να υπάρχουν πηγές ανάφλεξης- θα πρέπει να χρησιμοποιείται ανιχνευτής αερίων για να υπάρχει επίγνωση της συγκέντρωσης HC στον αέρα πριν και μετά την εκτέλεση των εργασιών. Τα εργαλεία που

χρησιμοποιούνται σε προσωρινές εύφλεκτες ζώνες πρέπει να είναι κατάλληλα για εργασία σε δυνητικά εκρηκτικές ατμόσφαιρες.



https://www.youtube.com/watch?v=xyANahuhGs0&ab_channel=HealthandSafetyExecutive

ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ ΓΙΑ ΑΥΤΗΝ ΤΗΝ ΕΝΟΤΗΤΑ

Αυτή η ενότητα θα πρέπει να παρέχεται με τη χρήση ποικίλων προσεγγίσεων μάθησης και διδασκαλίας, όπως δομημένα μαθήματα με διαμορφωτικές και συνοπτικές αξιολογήσεις, εκτός από την πρακτική επίδειξη του ασφαλούς χειρισμού του υδρογόνου, όπου είναι δυνατόν. Το υποστηρικτικό υλικό, ιδίως οι διαδραστικές δραστηριότητες, θα πρέπει να αξιοποιούνται πλήρως κατά την παράδοση όλων των ενοτήτων HySkills.