



Europees "Train the Trainer"-programma voor hulpverleners

Les 8

Ontstekingsbronnen en het voorkomen van de ontsteking

NIVEAU I

Brandweerman

De informatie in deze les is gericht op het niveau van **brandweerman**.

Dit onderwerp is ook beschikbaar op niveau IV (specialist).

Deze les maakt deel uit van een pakket met opleidingsmateriaal voor de niveaus I tot IV: brandweerman, onderofficier, officier en specialist. Gelieve de les af te stemmen op de competenties en de leerverwachtingen van de doelgroep.

Opmerking: dit materiaal is eigendom van het HyResponder Consortium en moet als dusdanig erkend worden; de resultaten van HyResponse zijn als basis gebruikt.



Disclaimer

Ondanks de zorg waarmee dit document werd opgesteld, is de volgende disclaimer van toepassing: de informatie in dit document wordt verschaft zoals ze is; er wordt geen enkele garantie gegeven dat de informatie geschikt is voor een bepaald doel. De gebruiker gebruikt de informatie op eigen risico en verantwoordelijkheid.

Het document bevat enkel de meningen van de auteurs. De FCH JU en de Europese Unie zijn niet aansprakelijk voor enig gebruik dat gemaakt zou worden van de hierin verschaft informatie.

Dankwoord

Het project heeft subsidies ontvangen van de Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) onder subsidieovereenkomst nr. 875089. De JU ontvangt steun van het onderzoeks- en innovatieprogramma Horizon 2020 van de Europese Unie en van het Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, Oostenrijk, België, Spanje, Duitsland, Italië, Tsjechië, Zwitserland en Noorwegen.

Overzicht

Waterstof wordt zeer gemakkelijk ontstoken doordat zijn minimale ontstekingsenergie een van de laagste is van alle bekende brandstoffen. Het is vaak moeilijk om de precieze bron van de ontsteking van waterstof en het specifieke mechanisme ervan te bepalen. In deze les wordt een overzicht gegeven van incidenten en mechanismen van ontsteking van waterstof.

Trefwoorden

Minimale ontstekingsenergie, zelfontstekingstemperatuur, ontstekingsbronnen, ontstekingsmechanismen

Inhoudstafel

Overzicht	3
Trefwoorden	3
1. Doelgroep	5
1.1 Taakomschrijving: brandweerman	5
1.2 Competentieniveau: brandweerman	5
1.3 Voorkennis: brandweerman	5
2. Inleiding en doelstellingen	6
3. Ontstekingsbronnen	7
3.1 Ontsteking door elektrostatische ontlading	8
3.2 Mechanische ontsteking	8
3.3 Ontsteking door een heet oppervlak	8
4. Ontstekingsmechanismen van waterstof	9
4.1 Minimale ontstekingsenergie	10
4.2 Zelfontstekingstemperatuur	12
4.3 Diffusie-ontsteking	12
5. Spontane ontsteking bij plotse ontsnapping	13
5.1 Diffusie-ontstekingsmechanisme	13
6. Preventie van ontsteking van waterstof	14
6.1 Beheersing van thermische en mechanische ontstekingsbronnen	15
Referenties	16

1. Doelgroep

De informatie in deze les is gericht op NIVEAU 1: brandweerman. Er zijn ook lessen beschikbaar op niveau II, III en IV: onderofficier, officier en specialist.

De taakomschrijving, het competentieniveau en de leerverwachtingen waarvan wordt uitgegaan op het niveau van brandweerman worden hieronder beschreven.

1.1 Taakomschrijving: brandweerman

Een brandweerman is verantwoordelijk en wordt verwacht in staat te zijn om op een veilige manier interventies uit te voeren met persoonlijke beschermingsmiddelen, inclusief ademhalingsbescherming, waarbij hij de ter beschikking gestelde uitrusting gebruikt, zoals voertuigen, ladders, slang, blusapparaten, communicatie- en uitrusting, in eender welke klimatologische omstandigheden, op eender welke plaats en in alle noodsituaties waarin redelijkerwijs kan worden verwacht dat er een antwoord geboden moet worden.

1.2 Competentieniveau: brandweerman

Een brandweerman dient opgeleid te zijn in het veilig en correct gebruik van PBM, ademhalingsbescherming en andere uitrusting die hulpverleners verwacht worden te gebruiken, waarbij ondersteuning door passende kennis en oefening noodzakelijk is. Gedrag dat hun eigen veiligheid en die van andere collega's beschermt, moet beschreven worden in standaard operationele procedures. Vaardigheid en oefening in het dynamisch beoordelen van risico's voor de eigen veiligheid en die van anderen zijn noodzakelijk.

1.3 Voorkennis: brandweerman

Een brandweerman dient te beschikken over basiskennis en praktische basisvaardigheden die vereist zijn om relevante informatie te gebruiken om taken uit te voeren en standaard problemen met behulp van eenvoudige regels en hulpmiddelen op te lossen. Werken of studeren onder toezicht met enige zelfstandigheid.

2. Inleiding en doelstellingen

In deze les krijgen hulpverleners informatie over de mogelijke bronnen van ontsteking van waterstof en de daaraan verbonden mechanismen, waaronder het diffusiemechanisme van spontane ontsteking bij een plotse ontsnapping van waterstof. De voornaamste kenmerken van de ontsteking van een waterstof-zuurstofmengsel zullen worden besproken: minimale ontstekingsenergie, de afhankelijkheid van de waterstofconcentratie in het mengsel, de zelfontstekingstemperatuur en het effect van wrijvingselectriciteit. In deze les zullen ook de methoden worden besproken die worden gebruikt om de ontsteking van waterstof te voorkomen door een zorgvuldige evaluatie van de mogelijkheid van ontsteking en het verwijderen van ontstekingsbronnen.

Aan het eind van deze les kan een hulpverlener/cursist:

- De verschillende soorten ontstekingsbronnen herkennen;
- Ontstekingsmechanismen van waterstof identificeren, in functie van de ontstekingsbron;
- De minimale ontstekingsenergie en zelfontstekingstemperatuur van waterstof vergelijken met die van andere gangbare brandstoffen;
- De minimale ontstekingsenergie uitleggen als functie van het waterstofgehalte in het mengsel;
- De stadia van de spontane ontsteking van plots vrijgekomen waterstof beoordelen;
- Het middel herkennen voor de beheersing van ontstekingsbronnen voor waterstof;
- De voornaamste preventiemaatregelen voor de ontsteking van waterstof opnoemen.

3. Ontstekingsbronnen

Door de lage minimale ontstekingsenergie van waterstof is het vaak moeilijk om de precieze bron van de ontsteking van waterstof te bepalen. Daardoor is het vaak moeilijk om te bepalen waardoor de ontsteking van waterstof precies werd veroorzaakt en wat het ontstekingsmechanisme was.

Hieronder wordt een lijst gegeven van mogelijke ontstekingsbronnen.

Elektrische bronnen:

- Elektrische vonken (bv. van elektrische apparaten)
- Statische ontladingen (bv. in niet-geaarde deeltjesfilters)
- Elektrische boog (schakelaars, elektromotoren, draagbare telefoons, pagers en radio's).
- Bliksemontlading (bv. blikseminslag in de buurt van de ontluchtingspijp)
- Elektrische lading door de werking van apparatuur (compressoren, generatoren, voertuigen en andere bouwuitrusting)
- Kortsluitingen of andere elektrische uitrusting
- Onder stroom staande deeltjes

Mechanische bronnen:

- Mechanische vonken (van snel sluitende kleppen)
- Mechanische impact en/of wrijving
- Metaalbreuk
- Mechanische trillingen en herhaaldelijk buigen

Thermische bronnen:

- Hete oppervlakken (bv. verwarmingstoestellen)
- Open vlammen
- Hete stralen
- Uitlaatgassen (bv. verbrandingsmotoren en uitlaatpijpen)
- Explosieve ladingen (bv. ladingen die gebruikt worden in de bouw, vuurwerk of pyrotechnische apparatuur)
- Katalysatoren, explosieven en reactieve chemicaliën
- Schokgolven en/of fragmenten
- Gereflecteerde of herhaalde akoestische en schokgolven

Andere bronnen:

- Ioniserende straling (radioactiviteit)
- Elektromagnetische straling
- Ultrasonische straling
- Licht (laser/flits)
- Adiabatische compressie (drukverhoging)

Er wordt algemeen erkend dat zuivere gassen in normale omstandigheden niet elektrostatisch geladen worden [3], maar daarbij wordt meestal uitgegaan van een lage snelheid en druk. Wanneer gassen met een zeer hoge druk vrijkomen, wordt de stroom sonisch en is de kans op het optreden van een elektrostatische lading niet bekend. Het is bekend dat zuivere gassen de neiging hebben niet te veranderen, maar dat deeltjes in de gasstroom elektrostatisch geladen worden [3].

Het ontladingspad zou in veel praktijkgevallen waarschijnlijk kronkelend en niet in rechte lijn verlopen. Daardoor zou de ontlading van de waterstof moeten plaatsvinden via bochten, wat kan leiden tot erosie van de materialen op de oppervlakte van het ontladingspad, bv. leidingen, en de vorming van deeltjes die elektrostatisch geladen kunnen worden [3].

3.1 Ontsteking door elektrostatische ontlading

Er zijn drie belangrijke soorten elektrostatische ontlading: vonk, borstel en corona [1]. Een *vonkontlading* gebeurt tussen een hoogpotentiaalgeleider en een geaarde geleider. Een *borstelontlading* is een ontlading tussen een geladen isolator en een geleidend aardingspunt. Een *corona-ontlading* is een stille, meestal continue ontlading.

Jaren geleden uitgevoerde studies over afblaasinrichtingen voor waterstof toonden aan dat ontsteking zeldzaam was bij mooi weer, maar vaker voorkwam tijdens onweer, sneeuwregen, sneeuwval en koude nachten met vriestemperaturen [1].

3.2 Mechanische ontsteking

De voornaamste eigenschappen van brandende metaaldeeltjes of vonken die relevant zijn voor hun vermogen tot ontsteking van brandbare mengsels zijn:

- Grootte
- Materiaal
- Snelheid
- Temperatuur
- Aantal
- Verbrandingssnelheid en -tijd

Indien de contactdruk tussen twee metalen deeltjes en de snelheid bij impact, wrijving of schuren groot genoeg is, kunnen vonken ontstaan. Over het algemeen worden brandende deeltjes enkel geproduceerd wanneer de relatieve snelheid tussen de twee oppervlakken groter is dan 1 m/s [4].

3.3 Ontsteking door een heet oppervlak

Dit fenomeen, dat zich voordoet bij de meeste brandbare gas/stoom-luchtmengsels, houdt in dat de omgeving voor een voldoende hoge temperatuur zorgt zodat de verbrandingswarmte niet verloren kan gaan naar de omringende oppervlakken, wat toelaat dat een verbranding plaatsvindt (oxidatie) [3].

4. Ontstekingsmechanismen van waterstof

In 2007 publiceerden Astbury en Hawksworth een studie waarin ze een analyse maakten van de statistieken met betrekking tot ontstekingsincidenten bij waterstof en de eraan verbonden mechanismen [1]. De auteurs ontdekten dat er meldingen zijn geweest van de ontsteking van vrijgekomen waterstof onder hoge druk zonder duidelijke reden en er werden verschillende ontstekingsmechanismen gesuggereerd. Er werd benadrukt dat, hoewel er bij veel lekken een ontsteking optrad, er ook lekken gemeld waren waarbij er geen ontsteking plaatsvond. Voor de gevallen waarin een ontsteking optrad zonder duidelijke ontstekingsbron zijn de gesuggereerde mechanismen eerder speculatief en ontbreekt een zorgvuldige wetenschappelijke analyse. In deze studie werden de leemten in de kennis van de precieze ontstekingsmechanismen voor vrijgekomen waterstof blootgelegd. De mechanismen die door Astbury en Hawksworth [1] in beschouwing werden genomen omvatten het ontstaan van een elektrostatische lading, mechanische ontsteking, omgekeerd Joule-Thompson-effect, diffusie-ontsteking, plotse adiabatische compressie en ontsteking door een heet oppervlak. Deze mechanismen zullen verder in deze les besproken worden.

Bij een analyse van de Major Hazard Incident Database Service van de Health and Safety Executive¹ (VK) ontdekten Astbury en Hawksworth [1] 81 incidenten met vrijgekomen waterstof. In slechts vier van deze gevallen werd een vertraging tussen het vrijkomen en de ontsteking gemeld. De auteurs gingen ervan uit dat de ontsteking van de waterstof in de andere gevallen onmiddellijk gebeurde. In 11 gevallen werd de ontstekingsbron geïdentificeerd, maar in de overige gevallen, d.w.z. bij 86,3% van de incidenten, was de ontstekingsbron niet duidelijk. Bij het vrijkomen van andere gassen dan waterstof, was er in 1,5% van de gevallen geen ontsteking en werd de ontstekingsbron in 65,5% van de gevallen niet geïdentificeerd. Dit bevestigt het vermoeden dat er een verschil is in de neiging tot ontsteking bij het vrijkomen tussen waterstof en andere gassen. De volgende incidenten/ongevallen werden bestudeerd door Astbury en Hawksworth [1], onder andere. In werk van Nusselt in Duitsland werd melding gemaakt van verschillende spontane ontstekingen van waterstof bij 2.1 MPa waarbij er een ontlading naar de atmosfeer plaatsvond. Er werd ijzeroxide (d.w.z. roest) opgemerkt in de opslagcilinders, ook al leken ze droog, en er werd eerst gedacht dat een elektrostatische lading mogelijk was. De experimenten waarbij men waterstof liet vrijkomen naar een open trechter met een lange buis toonden geen ontstekingen, behalve wanneer de trechter afgesloten werd met een ijzeren deksel. Het mechanisme werd niet duidelijk, daarom werden er verdere proeven uitgevoerd. Enkel wanneer deze proeven in het donker plaatsvonden, werd een corona-ontlading geobserveerd. Wanneer waterstof over een flens lekte en men op de buis tikte om stof op te woelen, werd de corona-ontlading groter. Na het tikken was er een ontsteking. Verder onderzoek toonde dat wanneer gescherpte koperdraad werd gebruikt om corona-ontladingen te bevorderen, de ontsteking plaatsvond wanneer de punt weggebogen was van de richting van het gas, terwijl er geen ontsteking plaatsvond wanneer de draad in de richting van de stroom wees [1].

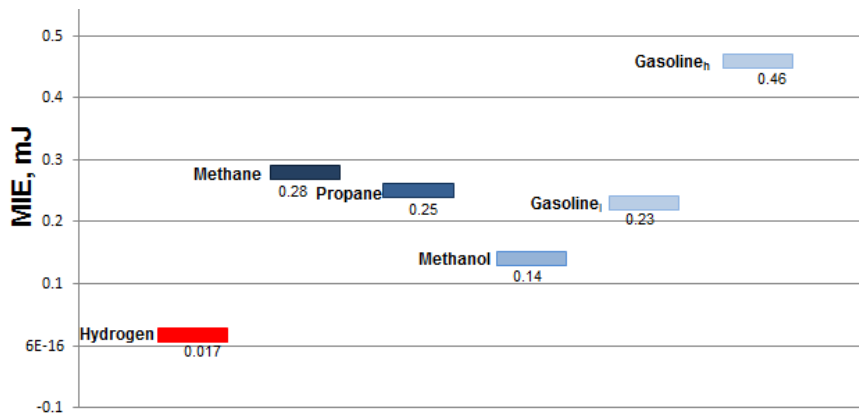
¹ In deze databank worden gevallen waarin vrijgekomen waterstof zich gewoon verspreidde en niet leidde tot brand, explosie of andere belangrijke risico's niet opgenomen. Het feit dat er geen gevallen van niet-ontsteking gemeld worden wil dus niet noodzakelijk zeggen dat de waterstof altijd ontstoken wordt.

Een ander incident dat door Astbury en Hawksworth [1] vermeld wordt, heeft betrekking op een waterstofcilinder die aangesloten wordt op een laboratoriumtoestel. Een laboratoriummedewerker forceerde de klep bij het openen ervan om vuil uit de aansluiting te verwijderen en het ontsnapte gas ontstak onmiddellijk. Bond [5] schreef deze ontsteking toe aan het fenomeen *diffusie-ontsteking* in 1991. Hoewel er bij dit incident geen druk van het gas wordt vermeld, kan aangenomen worden dat de druk de typische volle cilinderdruk van 23 MPa was. Reider et al. [16] deden een test met een grote hoeveelheid vrijgekomen waterstof om het geluidsdrukkniveau te bepalen. Men liet gedurende 10 s gasvormige waterstof vrijkomen met een begindruk van 23,6 MPa en een beginsnelheid van 54,4 kg/s. Het gas werd door een buis met een nominale diameter van 200 mm en een kogelklep met een diameter van 150 mm naar een cilindervormig vat geleid, dat uitgerust was met een convergent-divergente straalpijp met afblaas naar de atmosfeer. In de test waarbij het gas niet met opzet werd ontstoken, werd de klep van 150 mm na 10 s gesloten en vond er een ontsteking plaats 3 s nadat men begon met het sluiten van de klep. De drie onderzochte mogelijke ontstekingsmechanismen waren: elektrificatie van het gas, elektrificatie van deeltjes in het gas, en metaaldeeltjes die tegen een over de opening van de straalpijp gelaste metalen stang schuren. De eerste hiervan werd buiten beschouwing gelaten aangezien men weet dat zuivere gassen verwaarloosbare elektrostatische ladingen hebben. Het tweede mechanisme werd in aanmerking genomen, maar het systeem was vóór de test grondig schoongemaakt en afgeblazen. De snelheid waarmee men het gas liet vrijkomen, 1216 m/s, was echter veel hoger dan bij voorgaande tests, waardoor men dit mogelijke mechanisme niet buiten beschouwing kon laten. Het derde mechanisme werd als mogelijkheid beschouwd aangezien de snelheid van het vrijkomen hoog was, waardoor deeltjes mogelijk losgerukt werden en tegen de stang botsten. Dit mechanisme moest ook in aanmerking worden genomen. Na de ontsteking werd echter vastgesteld dat de stang aan één kant losgerukt was, wat zou kunnen wijzen op een mogelijke ontstekingsbron die niet was voorzien. Bovendien maakten ook Chaineaux et al. (1991) [6] en Groethe et al. (2005) [7] melding van een "onverwachte" spontane ontsteking van waterstof in experimenten op grote schaal.

4.1 Minimale ontstekingsenergie

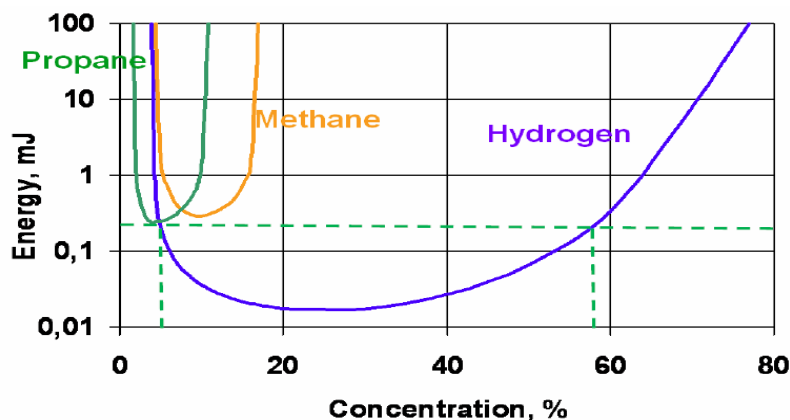
De minimale ontstekingsenergie van brandbare gassen en dampen is de minimumwaarde van de elektrische energie die in het ontladingscircuit opgeslagen wordt met een zo klein mogelijk verlies in de toevoerleidingen, die (bij ontlading via een vonkbrug) net zorgt voor de ontsteking van het mengsel in rust in de meest ontvlambare samenstelling. Een zwakke vonk veroorzaakt door de ontlading van statische elektriciteit van een menselijk lichaam kan voldoende zijn om eender welke brandstof te ontsteken [3]. Voor een bepaalde mengselsamenstelling moeten de volgende parameters van het ontladingscircuit gevarieerd worden om tot de optimale voorwaarden te komen: elektrische capaciteit, inductiviteit, laadspanning, vorm en afmetingen van de elektroden en afstand tussen de elektroden [4]. Behalve de mengselsamenstelling hangt de minimale ontstekingsenergie ook af van andere factoren, zoals de begindruk en de begintemperatuur. Aangezien de meeste ontstekingsbronnen meer dan 10 mJ genereren, zouden praktisch alle brandstoffen ontstoken worden in een mengsel met lucht wanneer hun concentratie de onderste ontvlambaarheidsgrens overschrijdt. Ontstekingsbronnen die een schok kunnen veroorzaken, bijvoorbeeld vonkontladingen met een grote energie en springstoffen, kunnen direct een detonatie inleiden.

Zoals getoond in **figuur 1** heeft waterstof in vergelijking met andere brandstoffen de laagste minimale ontstekingsenergie, die respectievelijk 0,017 mJ bedraagt voor waterstof-luchtmengsels en 0,0012 mJ voor waterstof-zuurstofmengsels. (Zie ook de les 2 "Eigenschappen van waterstof".) Zoals eerder vermeld is de minimale ontstekingsenergie een functie van de waterstofconcentratie in het brandbare mengsel (met lucht of met eender welk ander oxidatiemiddel). Voor een bepaald brandbaar mengsel en een type ontsteking is er een minimale energie afhankelijk van de concentratie waaronder er geen ontsteking plaatsvindt. De minimale ontstekingsenergie wordt oneindig bij de ontvlambaarheidsgrenzen (**figuur 2**). Over het ontstekingsgebied van waterstof-luchtmengsels varieert de ontstekingsenergie met bijna drie grootteordes.



Figuur 1. Minimale ontstekingsenergie voor waterstof en andere brandstoffen.

Zoals getoond in **figuur 2** zal een bron met een ontstekingsenergie van 0,24 mJ geen ontsteking veroorzaken bij methaan of propaan, maar wel bij een mengsel van waterstof en lucht binnen het concentratiebereik van 6,5 tot 58% vol waterstof. Een bron met een energie van 1 mJ zal een waterstof-luchtmengsel met een waterstofgehalte tussen 6 en 64% vol ontsteken. Er dient opgemerkt te worden dat de ontstekingsenergie bij de ontvlambaarheidsgrenzen min of meer gelijkaardig is voor de drie brandstoffen. Deze waarde is relatief hoog in vergelijking met de minimale ontstekingsenergie en veel ontstekingsbronnen zouden voor deze hoeveelheid energie kunnen zorgen. Er is minder energie nodig om een mengsel te ontsteken dat zich dichterbij zijn stoichiometrische samenstelling bevindt.



Figuur 2. Afhankelijkheid van de ontstekingsenergie van de concentratie van een brandstof (waterstof, propaan of methaan) in de lucht [8].

De energie die als statische elektriciteit op een voorwerp aanwezig is, varieert in functie van zijn afmetingen en elektrische capaciteit, de spanning waaraan het wordt onderworpen en de diëlektrische constante van het omgevende medium [3]. Voor het modelleren van het effect van statische ontlading wordt een mens beschouwd als een condensator van 100 picofarad (pF), onderworpen aan een spanning van 4.000 tot 35.000 volt. De totale energie ligt in de orde van millijoules (mJ). Grotere voorwerpen slaan meer energie op. Deze energie wordt normaal gezien ontladen in minder dan een microseconde en is voldoende om niet enkel bijna stoichiometrische mengsels te ontsteken, maar ook mengsels die zich dichtbij de ontvlambaarheidsgrenzen bevinden. Sommige isolatiematerialen, zoals hout, papier en bepaalde stoffen, vormen doorgaans een geleidende laag die de opbouw van statische elektriciteit kunnen voorkomen door water uit de lucht te absorberen in omgevingen waar de relatieve vochtigheid meer dan 50% bedraagt [9].

4.2 Zelfontstekingstemperatuur

De zelfontstekingstemperatuur is de minimale temperatuur die nodig is om een verbrandingsreactie van een brandstof-zuurstofmengsel op gang te brengen wanneer er geen externe ontstekingsbron is [3]. De standaard zelfontstekingstemperatuur van waterstof in lucht ligt boven 510 °C [10]. Dit is relatief hoog in vergelijking met koolwaterstoffen met lange moleculen. Deze zelfontstekingstemperatuur kan echter verlaagd worden door katalytische oppervlakken, zoals platina. Voorwerpen met temperaturen tussen 500 en 580 °C kunnen bij normale druk de ontsteking van waterstof-lucht- of waterstof-zuurstofmengsels veroorzaken. Aanzienlijk koelere voorwerpen met een temperatuur rond 320 °C kunnen bij langdurig contact de ontsteking van waterstof veroorzaken bij een lagere druk [11]. De ontstekingstemperatuur voor een hete straal bedraagt 670 °C [12].

4.3 Diffusie-ontsteking

Het fenomeen van diffusie-ontsteking werd berekend door Wolanski en Wojcicki [13], die aantoonde dat er een ontsteking optrad wanneer waterstof onder hoge druk in een met lucht of zuurstof gevulde schokbuis werd ingebracht. Zij stelden vast dat er een ontsteking bereikt kon worden zelfs wanneer de temperatuur lager was dan de zelfontstekingstemperatuur van de waterstof.

5. Spontane ontsteking bij plotse ontsnapping

5.1 Diffusie-ontstekingsmechanisme

Er zijn de laatste decennia veel pogingen gedaan om de spontane ontsteking van plots vrijgekomen waterstof te verklaren, te beginnen met de baanbrekende studie van Wolanski en Wojcicki [13] over het zogenaamde "mechanisme van diffusie-ontsteking", zoals besproken in punt 3.5. De experimentele gegevens gaven kritische voorwaarden van dit fenomeen. Jammer genoeg kunnen ze geen gedetailleerd inzicht bieden in de dynamieken van het proces. De precieze plaats van de initiële ontsteking en een progressie van de chemische reactie in de buizen stroomafwaarts van een barstschijf of klem kunnen bijvoorbeeld moeilijk geïdentificeerd worden met experimentele middelen bij hoge drukwaarden [3].

Men is het erover eens dat de waarschijnlijkheid van een spontane ontsteking van waterstof bij plots vrijkomen uit uitrusting onder hoge druk relatief hoog is wanneer er geen risicobeperkende maatregelen toegepast worden. De codes en normen bevatten echter geen referenties met betrekking tot het probleem van spontane ontsteking of een specifiek technisch ontwerp dat dit vermijdt of bevordert voor het overbrengen, de opslag en het gebruik van systemen met waterstof onder hoge druk [3]. De beheersing van de spontane ontsteking van vrijgekomen waterstof onder hoge druk vormt één van de uitdagingen op het vlak van de veiligheid van waterstof, waarvoor er nauwelijks een fundamentele verklaring bestaat.

6. Preventie van ontsteking van waterstof

De ontstekingsbronnen moeten op een passende manier geëlimineerd of geïsoleerd worden en men moet er bij waterstofinstallaties altijd van uitgaan dat er onvoorziene ontstekingsbronnen kunnen zijn. Er moeten aardingsmethoden toegepast worden om het risico op een statische ontlading en de mogelijkheid van blikseminslagen in buitenomgevingen tot een minimum te beperken. De voor gebruik met waterstof gekozen materialen moeten beoordeeld worden op hun vermogen om statische elektriciteit te ontladen. Isolatiematerialen zoals hout, papier en bepaalde stoffen vormen doorgaans een geleidende laag die de opbouw van statische elektriciteit kunnen voorkomen door water uit de lucht te absorberen in omgevingen waar de relatieve vochtigheid meer dan 50% bedraagt. Aanbevolen praktijken voor aardingsmethoden om statische ontladingen te vermijden kunnen gevonden worden in verschillende nationale en internationale normen over de installatie van elektrische apparatuur in gevaarlijke omgevingen. De voor gebruik met waterstof gekozen elektrische apparatuur kan ook een bron zijn van vonken of warmteontwikkeling; men moet er daarom voor zorgen dat de toepasselijke nationale en internationale normen voor elektrische installaties gevolgd worden.

Er zijn verschillende manieren om het ontstekingsrisico te elimineren of ten minste te beperken. De Britse Health and Safety Executive heeft een lijst opgesteld van de volgende preventieve maatregelen [14]:

- Het gebruik van passende elektrische apparatuur (d.w.z. geschikte apparatuur voor de omgeving waarin ze wordt geïnstalleerd). De mechanische uitrusting moet op dezelfde manier gekozen worden.
- Aarding van alle uitrusting.
- Eliminering van oppervlakken met een temperatuur boven de zelfontstekingstemperatuur van de opgeslagen/gebruikte brandbare materialen.
- Bliksembescherming.
- Juiste keuze van voertuigen/interne verbrandingsmotoren die in de betrokken omgevingen kunnen werken.
- Juiste keuze van uitrusting om bronnen van elektromagnetische straling met een hoge intensiteit te vermijden, bv. beperking van stroomtoevoer naar glasvezelsystemen, vermijden van lasers of bronnen van infraroodstraling met een hoge intensiteit.
- Verbod op roken/het gebruik van lucifers of aanstekers.
- Controle over het gebruik van gewone voertuigen.
- Controle over de activiteiten die op bepaalde momenten gevarenczones creëren, bv. laden/lossen van tankwagens.
- Controle over de onderhoudsactiviteiten die kunnen leiden tot vonken/hete oppervlakken/open vlammen via een systeem van toelatingen voor het werk.
- Voorzorgsmaatregelen om het risico op aanslag van pyrofore stoffen te beheersen, waarbij gewoonlijk de vorming van ijzersulfide binnenin de procesuitrusting betrokken is.

6.1 Beheersing van thermische en mechanische ontstekingsbronnen

Een heet oppervlak kan leiden tot de ontsteking van een waterstof-luchtmengsel. Voor waterstof mag de temperatuur van hete oppervlakken of punten niet hoger zijn dan 585 °C, zelfs voor enkele mm², zoals experimenten uitgevoerd in het kader van het Europese MECHEX-project aantonen (merk op dat de zelfontstekingstemperatuur van waterstof, 510 °C, nog steeds lager is dan de hierboven vermelde temperatuur).

Een fysieke scheiding van ontstekingsbronnen, zoals lassen, vlammen of warm bewerken, heeft de voorkeur.

Een mechanische ontsteking is meestal het gevolg van mechanische stress door abnormale of on gepaste voorwaarden (d.w.z. wrijving, schuren en impact, of een combinatie van deze factoren) en bestaat meestal uit drie stappen: warmteontwikkeling, overdracht van warmte naar de omringende explosieve omgeving en tot slot de ontsteking zelf [15]. De beheersing van het risico op mechanische ontsteking vereist een zorgvuldig ontwerp van de uitrusting met één van de volgende middelen:

- Beperking van de rotatiesnelheid van onderdelen,
- Voldoende afstand tussen vaste en roterende onderdelen,
- Installatie van temperatuursensoren.

De door de impact geproduceerde energie bedraagt soms slechts enkele Joules en is voldoende om een waterstof-luchtmengsel te ontsteken. Om ontsteking door impact te vermijden is het nodig om [15]:

- Geschikt vonkvrij gereedschap te gebruiken,
- De installatie te spoelen vóór elke interventie,
- Contact tussen aluminium en staal te vermijden.

Er zijn een aantal gelijkenissen tussen warm bewerken en mechanische ontsteking, maar bij warm bewerken is de oorzaak geen mechanisch defect maar de menselijke activiteit. Ongevallen/incidenten als gevolg hiervan moeten vermeden worden door [15]:

- Te werken met vuurvergunningen (monitoring werken open vlam),
- Een passende opleiding van het betrokken personeel,
- Geschikte brandblusuitrusting ter beschikking te stellen,
- Tijdens interventies de gastoevoer af te sluiten,
- De installatie vóór elke interventie te spoelen.

Referenties

1. Astbury, GR and Hawksworth, SJ (2007). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: a review of postulated mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, pp. 2178-2185.
2. Moorehouse, J, Williams, A and Maddison TE (1974). An investigation of the minimum ignition energies of some C1 to C7 hydrocarbons. *Combustion and Flame*. Vol. 23, pp. 203-213.
3. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II*. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
4. HyFacts Project. Chapter IM. Hydrogen ignition mechanisms. Prevention and mitigation of ignition. Available from: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [accessed on 23.11.20].
5. Bond, J (1991). *Sources of ignition: flammability characteristics of chemicals and products*. Oxford: Butterworth Heinemann.
6. Chaineaux, J, Mavrothalassitis, G and Pineau, J (1991). Modelization and validation of the discharge in air of a vessel pressurized by flammable gas. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 134, pp. 104-137.
7. Groethe, M, Merilo, E, Colton, J, Chiba, S, Sato, Y and Iwabuchi, H (2005). Large-scale hydrogen deflagrations and detonations, *Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety*, 8-10 September 2005, Pisa, Paper 120105.
8. Schmidchen, U (2009). Hydrogen safety facts and myths. 3rd International Short Course and Advanced Research Workshop “Progress in Hydrogen Safety”, Belfast, 27th April-1st May 2009, Northern Ireland, UK.
9. ISO/TR 15916 (2004). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
10. BRHS, *Biennial Report on Hydrogen Safety (2009)*. The European network of excellence “Safety of hydrogen as an energy carrier” (NoE HySafe). Available from: www.hysafe.org [accessed on 23.11.20].
11. Baratov, AN, Korolchenko, AY and Kravchuk, GN (Eds.) (1990). *Fire and explosion hazards of substances and materials*. Moscow: Khimia. 496 p., ISBN 5-7245-0603-3 part 1, ISBN 5-7245-0408-1 part 2 (in Russian).

12. NASA (1997). Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation. Technical report NSS 1740.16, Office of safety and mission assurance, Washington. Available from: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf> was cancelled on July 25 2005 [accessed 13.05.14].
13. Wolanski, P and Wojcicki, S (1972). Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere. Proceedings of the Combustion Institute. Vol. 14, pp. 1217-1223.
14. Health and Safety Executive (2012). Hazardous Area Classification and Control of Ignition Sources. Available from: <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareaclas.htm> [accessed 23.11.20].
15. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. PhD thesis. University of Ulster.
16. Reider, R, Otway, HJ and Knight HT (1965). An unconfined large volume hydrogen/air explosion. Pyrodynamics. Vol. 2, pp. 249-261.