

Les défaillances dues à la fragilisation par l'hydrogène : un phénomène évitable ?

25 septembre 2020, 02:00

Walter Lauwerens

En 2015, en plein cœur de Londres, trois méga-boulons sont soudainement tombés d'un gratte-ciel de 225 m de haut. Si l'incident n'a pas fait de blessé, on a craint qu'il se reproduise pour les 3.000 boulons restants. La charge sur les jonctions constitutives de la structure en acier était d'environ 6.000 tonnes. Quelle est la cause de ces ruptures soudaines, et comment éviter une telle catastrophe ?

L'hydrogène dans le métal

Le minuscule atome d'hydrogène est l'un des éléments les plus courants dans l'espace. Sur terre, l'hydrogène est présent dans des composés chimiques comme l'eau et dans de nombreux composés organiques comme les hydrocarbures. L'hydrogène est donc un élément indispensable à la vie sur Terre, mais pour les métaux, il peut être dangereux. La raison en est la « fragilisation par l'hydrogène », un phénomène rare mais désastreux qui est un cauchemar pour tout constructeur.

Comme son nom l'indique, la présence d'hydrogène peut provoquer une fragilisation des métaux. Les métaux peuvent ainsi se briser soudainement, sans signes avant-coureurs. Il existe plusieurs autres mécanismes de fragilité, tels que la fragilité bleue de l'acier de construction à des températures d'environ 300 °C, la fragilité à basse température, etc. La fragilisation par l'hydrogène est l'une des plus redoutées, car on ne peut généralement pas en prévoir l'apparition.

Comment l'hydrogène pénètre-t-il dans le métal ? C'est une question vitale à laquelle il existe de multiples réponses. Il se produit dans les processus où l'hydrogène atomique se forme à partir de composés d'hydrogène. Les principales sources d'hydrogène atomique sont les réactions chimiques telles que la corrosion ou le décapage à l'acide, mais aussi des processus électrolytiques comme la galvanisation et la décomposition de l'humidité par la chaleur, par exemple lors d'activités de soudage, de moulage, etc. Toutes ces réactions sont des sources potentielles d'hydrogène atomique. En outre, lors d'un traitement thermique tel que la cémentation, il se forme de l'hydrogène qui peut s'accumuler dans l'acier. Grâce à sa petite taille, l'atome d'hydrogène peut facilement pénétrer le réseau métallique (« diffusion ») et se déposer à certains endroits. Les atomes peuvent s'y unir pour former des molécules d'hydrogène, qui ne se diffusent plus, et provoquer l'accumulation locale d'une pression de gaz qui peut dépasser la limite d'élasticité. Dans un tel cas, une microfissure apparaîtra. Au fil du temps, celle-ci peut se transformer en une rupture fatale.

Un deuxième facteur est toutefois nécessaire pour faire naître la fragilisation par l'hydrogène : une résistance élevée. Des tests ont montré que les aciers doux n'étaient pas sujets à la fragilisation par l'hydrogène, contrairement aux aciers à haute résistance dont la dureté est supérieure à 32 HRC (et la résistance à la traction supérieure à 1000 MPa). Cette observation est particulièrement importante pour les boulons, car ils présentent généralement une dureté de ce type (par exemple les boulons 10.9 et 12.9). Certains aciers inoxydables sont également sensibles, par exemple l'AISI 300, mais pas les inox classiques comme AISI 304 et 316. Les métaux austénitiques tels que l'acier inoxydable, l'aluminium et le cuivre ont un réseau cristallin différent de celui de l'acier et semblent ne pas être sensibles à la fragilisation par l'hydrogène. Dans le cas de l'aluminium, la fragilisation par l'hydrogène ne peut se produire qu'à des températures élevées.



Par précaution, les boulons d'origine du squelette en acier ont été équipés d'un dispositif antichute.

Reconnaissance de la rupture due à l'hydrogène

Il n'est pas toujours évident de reconnaître une rupture due à l'hydrogène. Il existe des caractéristiques typiques qui peuvent être déterminées au microscope électronique. Citons les surfaces de fission présentant de petits pores (gaz), des limites de grain ouvertes sous la forme de « pattes d'oie ». Dans de nombreux cas, l'imputation causale repose sur l'élimination d'autres facteurs potentiels. La fracture se produit en effet sans cause démontrable et généralement assez vite après l'utilisation de la pièce.



Image SE d'une surface de fracture causée par l'hydrogène

Réparation des dommages

L'exemple ci-dessus d'un événement presque catastrophique illustre bien l'importance d'étudier ce phénomène. De nombreux autres exemples ont été rencontrés dans le passé (p. ex des fractures sur des ponts) aux conséquences parfois mortelles. Dans certains cas, comme celui du Leadenhall Building à Londres, les premiers dommages ont déclenché l'alerte. Il a ainsi été possible de mettre en place assez rapidement une opération de réparation à grande échelle. Les 3.000 boulons ont ainsi été remplacés préventivement par des boulons fabriqués dans un autre acier et dotés d'un revêtement anticorrosion. Les boulons ont également été recuits avant l'assemblage. Réputé de longue date comme le remède pour éliminer l'hydrogène de l'acier, ce traitement est principalement appliqué après le revêtement électrolytique des métaux, comme la galvanisation, l'étamage, etc. Des procédés métallurgiques spéciaux, tels que la refonte sous vide et le dégazage sous vide, ont été mis au point pour éliminer les gaz dissous dans l'acier lors de la production.

Nouvelles évolutions

On mène des recherches sur la fragilisation par l'hydrogène dans le monde entier. Il existe en effet de nombreuses applications dans l'industrie technologique dans lesquelles les métaux sont en

contact avec l'hydrogène (atomique). Pensons par exemple à l'industrie chimique, où la production de gaz hydrogène et les processus d'hydrogénation sont courants. Il sera donc utile d'étudier davantage le mécanisme et de développer des aciers plus résistants à l'hydrogène. Dans un passé récent, Arcelor-Mittal et Ocas NV ont organisé une conférence internationale sur ce thème (Steely Hydrogen). Des chercheurs de plusieurs pays sont venus présenter leurs résultats aux entreprises intéressées.

Récemment, un revêtement à base de matériau en phase MAX a été développé à l'Institut Fraunhofer IWM en collaboration avec l'Université de Fribourg. Les matériaux en phase MAX sont des matériaux céramiques spéciaux à structure stratifiée. Ils peuvent notamment être appliqués comme revêtement par dépôt physique en phase vapeur (PVD). Le revêtement constitue une excellente barrière contre l'hydrogène, qui est empêché de pénétrer dans le métal. Un essai spécifique a montré que l'acier revêtu, après un traitement thermique par lequel une couche de Al_2O_3 est formée, contenait jusqu'à 3.500 fois moins d'hydrogène que sans revêtement. Le procédé de dépôt du revêtement en phase MAX doit encore être développé, mais selon les chercheurs, les résultats sont prometteurs pour des applications telles que les piles à combustible et les turbines à gaz.

Dans le département Métaux de Sirris à Zwijnaarde, ces recherches sur les fractures peuvent être effectuées en collaboration avec les autres partenaires du Materials Research Cluster. Sur le site Sirris de Diepenbeek, il est possible d'appliquer et d'étudier différents revêtements sur l'acier.

Sources

- <https://coatings.specialchem.com>
- <https://www.fastenerandfixing.com>
- <https://www.imetllc.com>

Auteurs



Walter Lauwerens