

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025	Does Not Contain ITAR Controlled Data
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025	Cancelled Revision 01

1. KAPSAM

- 1.1. Bu eğitim dokümanı HSF üretim süreçleri kapsamında dahili ve harici tüm süreçler için uygulanan **Hidrojen Gevrekliği (Kırılabilirliği) (HE)** Politikasının detaylı açıklanmasını kapsamaktadır.
- 1.2. **Urün Güvenliği:** HSF, HE'yi ürün güvenliği için hayati bir unsur olarak kabul etmektedir ve HE onleyici politikalarını her zaman aktif tutmaktadır.
- 1.3. **Kullanıcı Seviyesi:** Bu belgenin kullanıcı seviyesi kalite kontrol ve süreç onay mühendisleridir.
- 1.4. **Uygulayıcı Sorumluluğu:** HSF HE Politikası, üretim risk değerlendirmesi aşamasında başlar. Kalite kontrol mühendisleri, aşağıdaki süreçlerden sonra metallerin HE durumlarının kontrolünden ve onayından sorumludur:
 - 1.4.1. Hammadde kabul,
 - 1.4.2. Hammadde sekillendirme,
 - 1.4.3. Isıl İşlem,
 - 1.4.4. Kaplama veya Yağlama,
 - 1.4.5. Kaynak,
- 1.5. **Online Ziyaretçi Sorumluluğu:** Bu dokümanda yer alan bilgiler HSF fabrika alanı ve üretim süreçleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Online ziyaretçiler bu dokümanda yer alan bilgileri kendi kapasiteleri kapsamında kullanmasından sorumludur, HSF'nin her hangi bir sorumluluğu yoktur.
- 1.6. **Risk Değeri:** HSF HE Politikası kapsamında tüm hidrojen kaynaklı risk değerlendirmeleri için risk değerini en az **Yüksek Öncelikli** olarak kabul edilir ve tüm hidrojen kaynaklı riskler için aktif FMEA kayıtları ve onleyici politikalar geliştirilir.
- 1.7. Elektrokaplama ve elektrolitik olmayan kaplama ve asitle temizleme gibi yardımcı işlem adımları, hidrojen üretebilir ve bu hidrojen atomik formda hammaddenin iç yapısına girebilir ve bu durum hidrojen gevrekliğine neden olabilir.
- 1.8. HSF bu eğitim dokümanında hidrojen gevrekliğine neden olan faktörleri, bunun sonucunda ortaya çıkan etkileri ve arıza mekanizmalarını belirtmeyi ve ardından sorunu azaltma veya ortadan kaldırma yöntemlerini açıklamayı amaçlamaktadır.

2. TANIM VE AMAC

- 2.1. **Hidrojen Gevrekliği (HE):** Atomik hidrojenin varlığı nedeniyle bir metalin kırılma seviyesinde veya hassasiyetinde azalmaya yol açan bir süreç.
- 2.2. **Hidrojen Çevresel Gevrekliği (HEE):** Bir malzemenin uygulanan bir gerilimin etkisi altındayken ve kasıtlı olarak gaz halindeki hidrojen ortamına maruz bırakılması sırasında oluşan belirli mekanik özelliklerin bozulması.
- 2.3. **HEE Indexi:** Belirli malzemeler üzerindeki hidrojen gevreklesmesi etkilerinin siddetini değerlendirmek için kullanılan malzeme tarama aracı.
- 2.4. **Dahili Hidrojen Gevreklesmesi (IHE):** Metallerin işleme (ısıtma) veya kaplama (yüzey hazırlama) süreçleri esnasında hassas metallere istem dışı hidrojen girmesi nedeniyle oluşan belirli mekanik özelliklerin bozulması.

1. SCOPE

- 1.1. *This training document covers a detailed explanation of HSF's **Hydrogen Embrittlement (HE)** Policy which is applied to all internal and external production processes implemented by HSF.*
- 1.2. **Product Safety:** HSF considers HE as a vital element for product safety and always keeps HE preventive policies active.
- 1.3. **User Level:** The user level of this document is the quality control and process approval engineers.
- 1.4. **User Responsibility:** HSF HE Policy begins at the production risk assessment stage. Quality control engineers are responsible for checking and approving the HE status of metals after the following processes:
 - 1.4.1. Raw material approval,
 - 1.4.2. Machinery or Forming,
 - 1.4.3. Heat Treatment,
 - 1.4.4. Coating or Lubrication,
 - 1.4.5. Welding,
- 1.5. **Online Visitor Responsibility:** The information in this document has been prepared considering the HSF factory area and production processes. Online visitors are responsible for using the information in this document within their own capacity, HSF has no responsibility.
- 1.6. **Risk Value:** Within the scope of the HSF HE policy, the risk value for all hydrogen-related risk assessments is considered as minimum **High Priority** and active FMEA records and preventive policies are developed for all hydrogen-related risks.
- 1.7. *Electrodeposition and electroless deposition and their associated processing steps, including acid pickling and electro-cleaning, can generate hydrogen, which can enter substrates in the atomic form and cause hydrogen embrittlement.*
- 1.8. *In this training document, HSF aims to specify the factors that cause hydrogen embrittlement, its subsequent effects, and failure mechanisms and then elaborates on methods for reducing or eliminating the problem.*

2. DEFINITIONS AND ACRONYMS

- 2.1. **Hydrogen Embrittlement (HE):** A process resulting in a decrease in the fracture toughness or ductility of a metal due to the presence of atomic hydrogen.
- 2.2. **Hydrogen Environmental Embrittlement (HEE):** The degradation of certain mechanical properties that occur while a material is under the influence of an applied stress and intentionally exposed to gaseous hydrogen environment.
- 2.3. **HEE Index:** An initial material screening tool to evaluate the severity of hydrogen embrittlement effects on certain materials.
- 2.4. **Internal Hydrogen Embrittlement (IHE):** The degradation of certain mechanical properties that occur due to the unintentional introduction of hydrogen into

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025	Does Not Contain ITAR Controlled Data
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025	Cancelled Revision 01

2.5. Hidrojen Reaksiyonu Gevrekliği (HRE): Hidrojenin metal kimyasal yapısıyla reaksiyona girerek nispeden düşük sıcaklıklarda metal hidrit gibi metalik bileşikler oluşmasıyla oluşan belirli mekanik özelliklerin bozulması. Bu hidrojen hasar veya zarar turu titanyum, zirkonyum ve hatta bazı demir veya çelik bazlı alaşımlar gibi hammaddelerde daha çok meydana gelebilir.

- 2.6. Darbe Test Dayanımı (NTS),**
2.7. Alan Azalma (RA),
2.8. Plastik Uzama (EL),

susceptible metals during forming (heating) or finishing operations (surface treatment).

2.5. Hydrogen Reaction Embrittlement (HRE): The degradation of certain mechanical properties that occur when hydrogen reacts with the metal matrix itself to form metallic compounds such as metal hydride at relatively low temperatures. This form of hydrogen damage can occur in materials such as titanium, zirconium, and even some types of iron or steel-based alloys.

- 2.6. Notched Tensile Strength (NTS),**
2.7. Reduction of Area (RA),
2.8. Plastic Elongation (EL),

3. TANIM VE AMAC

- 3.1. HE,** metallerin imalatı, şekillendirme, işleme, kaplama veya kullanımı esnasında doğrudan veya dolaylı temas yoluyla hidrojen emmesinin doğal bir sonucudur.
- 3.2. HE,** gücsüzleşen metalin gecikmeli veya ani güç kaybına ve yük taşıma kapasitesinin azalmasına yol açar.
- 3.3.** Hidrojen emmiş malzemeye uygulanan gerilim, çatlamalara ve ani veya gecikmiş, yıkıcı kırılma hasarlarına yol açabilir.
- 3.4.** Hidrojen gevrekliği sürecine neden olmak için, üç temel koşulun aynı anda mevcut olması gerekir.

3. DEFINITIONS AND ACRONYMS

- 3.1. HE** is a natural result of hydrogen absorption by metals through direct or indirect contact during manufacturing, forming, machining, finishing, or use.
- 3.2. HE** leads to delayed or sudden loss of ductility and reduced load-bearing capability.
- 3.3.** Stress loading on the embrittled material can result in cracking and sudden or delayed catastrophic brittle failures.
- 3.4.** To cause hydrogen embrittlement process, three elemental conditions must be present concurrently.

HİDROJEN GEVREKLİĞİNİN OLUŞUMU İÇİN GEREKLİ 3 KOSUL 3 CONDITIONS NECESSARY FOR THE FORMATION OF HYDROGEN EMBRITTELEMENT

HASSAS HAMMADDE DURUMU SUSCEPTIBLE MATERIAL CONDITION	GERILIM VE YÜK STRESS AND LOAD	HİDROJEN KAYNAĞI HYDROGEN SOURCE
⇒ Çekme Dayanımı 1000 MPa'dan Yüksek Olan Hammaddeler <i>The Materials which have Material Tensile Strength which have over 1000 MPa</i>	⇒ Sürekli Çekme, Stres, Yük ve/veya Titreşim <i>Continuous Tensile, Stress, Load and/or Vibration</i>	Yeterli Hidrojen İyon Konsantrasyonu: ⇒ Hammadde Üretimi, ⇒ Asit Temizleme, ⇒ Elektrokaplama Kaplama ⇒ Çevresel Durumlar
⇒ Sertliği 390 HV (40 HRC) Ustü Olan Hammaddeler <i>The Materials which have Hardness over 390 HV (40 HRC)</i>		Sufficient Hydrogen Ion Concentration: ⇒ Raw Material Manufacturing, ⇒ Acid Cleaning, ⇒ Electroplating Coating, ⇒ Environmental Exposure

4. HİDROJENİN ZARARLI ETKİLERİ

- 4.1.** Hidrojen gevrekliğinin etkileri nikel, titanyum, alüminyum ve kimyasal olmayan bakır yataklarında da izlenebilir. Elektrokaplama gibi bir yolla hidrojen kabarcıkları metalle bileşimi sağlanırsa herhangi bir malzemenin basınç etkisiyle gevrekleşebileceği ve bu durumun hidrojen atomları kabarcıklardan kaçana kadar değişmeden kaldığı görülmektedir.
- 4.2.** Hidrojenin metaller üzerinde çeşitli zararlı etkileri vardır. Hidrojen kaynaklı metal bozulması, metalin atmosferle teması sonucu oluşur ve burada hidrojen malzemeye emilir ve mekanik performansı azalır. Hidrojen hasarının şiddeti ve modu aşağıdakilere bağlıdır:
- 4.2.1.** hidrojen kaynağı - harici (gaz halinde) / dahili (çözülmesi),
- 4.2.2.** maruz kalma süresi,
- 4.2.3.** sıcaklık ve basınç,

4. HARMFUL EFFECTS OF THE HYDROGEN

- 4.1.** Hydrogen embrittlement effects can also be monitored in the nickel, titanium, aluminum, and electroless copper deposits. It appears that any material can become embrittled by a pressure effect if hydrogen bubbles are introduced by a means such as electrodeposition and this state remains unchanged until hydrogen atoms escape from the bubbles.
- 4.2.** Hydrogen has a diverse range of harmful effects on metals. Hydrogen-induced degradation of metals is caused by exposure to the atmosphere, where hydrogen is absorbed into the material and reduces its mechanical performance. The severity and mode of the hydrogen damage depends on:
- 4.2.1.** source of hydrogen - external (gaseous)/internal (dissolved),
- 4.2.2.** time of exposure,
- 4.2.3.** temperature and pressure,

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025	Does Not Contain ITAR Controlled Data
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025	Cancelled Revision 01

- 4.2.4. metallere bir miktar reaksiyona girebilecek solventlerin veya temizleyicilerin varlığı (örneğin asidik çözeltiler),
- 4.2.5. metal alâsımının türü ve üretim yöntemi,
- 4.2.6. metaldeki süreksizliklerin miktarı,
- 4.2.7. maruz kalan yüzeylerin işlenmesi (bariyer katmanları, örneğin metaller üzerindeki hidrojen geçirgenliği bariyerleri olarak oksit katmanları),
- 4.2.8. metal yüzeyinin son işlenmesi (örneğin kadmiyum veya nikel kaplama),
- 4.2.9. ısı işlem yöntemi,
- 4.2.10. kalıntı ve uygulanan gerilmelerin seviyesi.

5. HIDROJENİN ZARARLI ETKİLERİ

5.1. DEMİR TEMELLİ ALISIMLAR VE ÇELİKLER

- 5.1.1. Çeliklerin **HEE** duyarlılığı genel olarak dört kategoride görülebilir: ostenitik, ferritik, martensitik ve çökeltme sertleşmesi.
- 5.1.2. Genel olarak, düşük dayanımlı ostenitik çeliklerin çoğu, ferritik çeliklere kıyasla hidrojen gevreklesmesine karşı çok duyarlı değildir.
- 5.1.3. Ancak, martensitik ve çökeltme sertleşmesi çeliklerinin **HEE** ve **IHE** etkilerine karşı son derece duyarlı olduğu bilinmektedir.
- 5.1.4. **HRE** etkilerine gelince, belirli yüksek sıcaklık ve basınçlarda atomik hidrojen metalin içinden yayılabilir ve çelik esaslı alâsımlardaki belirli tipteki elementler ve bileşiklerle içsel olarak reaksiyona girebilir.
- 5.1.5. Hidrojen gevrekliğinin etkileri en çok çeliklerde kendini gösterir. Bu etkiler aşağıdaki şekilde olabilir.
- 5.1.5.1. kırılabilirliğin artması,
- 5.1.5.2. çatlak başlangıcının ve/veya yayılmasının kolaylaşması,
- 5.1.5.3. yüzey kabarcıkları, ve
- 5.1.5.4. çatlakları veya iç boşluklar gibi hidrojen kaynaklı hasarların gelişmesi ve belirli durumlarda kullanım özelliklerinde değişiklikler
- 5.1.6. Çeliklerde sorun, **dört temel faktörden bir veya daha fazlası** nedeniyle ortaya çıkar:
- 5.1.6.1. sıcaklık,
- 5.1.6.2. mikro yapı,
- 5.1.6.3. çekme gerilmeleri, ve
- 5.1.6.4. hidrojen içeriği

5.2. ALUMİNYUM VE ALUMİNYUM ALISIMLAR

- 5.2.1. Kuru hidrojen gazı ortamının alüminyum ve alâsımları üzerinde çok önemli etkileri vardır.
- 5.2.2. Hidrojenle ilgili temel sorun, esas olarak neme maruz kalmasından ve dökümhanenin eritme, döküm ve katılaşma süreçleri sırasında gazla dolu boşlukların oluşmasından kaynaklanmaktadır.
- 5.2.3. Bu boşluklar, döküm ve dövme ürünün kırılabilirlik ve kırılma seviyesi gibi mekanik özelliklerini etkileyen malzeme kusurlarıdır.

- 4.2.4. *presence of solutions or solvents that may undergo some reaction with metals (e.g. acidic solutions),*
- 4.2.5. *type of alloy and its production method,*
- 4.2.6. *amount of discontinuities in the metal,*
- 4.2.7. *treatment of exposed surfaces (barrier layers, e.g. oxide layers as hydrogen permeation barriers on metals),*
- 4.2.8. *the final treatment of the metal surface (e.g. cadmium or nickel plating),*
- 4.2.9. *method of heat treatment,*
- 4.2.10. *level of residual and applied stresses.*

5. HARMFUL EFFECTS OF THE HYDROGEN

5.1. IRON – BASED ALLOYS AND STEELS

- 5.1.1. *The **HEE** susceptibility of steels can generally be viewed in four categories: austenitic, ferritic, martensitic, and precipitation hardening.*
- 5.1.2. *In general, most low-strength austenitic steels are not very susceptible to hydrogen embrittlement, relative to the ferritic steels.*
- 5.1.3. *However, the martensitic and precipitation-hardening steels are known to be extremely susceptible to the **HEE** and **IHE** effects.*
- 5.1.4. *Concerning the **HRE** effects, at certain elevated temperatures and pressures, atomic hydrogen can diffuse through metal and react internally with certain types of elements and compounds in the steel-based alloys.*
- 5.1.5. *Hydrogen embrittlement effects are most pronounced in steels. These effects can take the form of*
- 5.1.5.1. *increased ductility,*
- 5.1.5.2. *ease of crack initiation and/or propagation,*
- 5.1.5.3. *the development of hydrogen-induced damage,*
- 5.1.5.4. *such as surface blisters and cracks or internal voids, and in certain cases changes in the yield behavior.*
- 5.1.6. *With steels, the problem occurs because of **one or more of four primary factors:***
- 5.1.6.1. *temperature,*
- 5.1.6.2. *microstructure,*
- 5.1.6.3. *tensile stresses, and*
- 5.1.6.4. *hydrogen content*

5.2. ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS

- 5.2.1. *The dry hydrogen gas environment has negligible effects on aluminum and its alloys.*
- 5.2.2. *The primary issue with hydrogen arises mainly from exposure to moisture and the formation of gas-filled voids during the foundry's molten, casting, and solidification processes.*
- 5.2.3. *These voids are material defects that affect both cast and wrought product's mechanical properties, such as ductility and fracture toughness.*

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025	Does Not Contain ITAR Controlled Data
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025	Cancelled Revision 01

5.3. BAKIR VE BAKIR ALISIMLAR

- 5.3.1. Bakir ve bakir acisindan zengin alasimler, oksijen veya bakir oksit icermedikleri surece genellikle hidrojen gevreklesmesine karsi hassas degildir.
- 5.3.2. Oksijen tasiyan bakir ve bakir alasimleri hidrojen ortaminda tavlandiginda veya isitildiginda, atomik hidrojen metallerin icine yayilir ve bakir oksit veya oksijenle reaksiyona girerek su olusturur; sicaklik 375 °C'nin (705 °F) uzerindeyse su yuksek basincli buhara donusur.
- 5.3.3. Bu, HRE'nin klasik bir ornegidir, cunku buhar, disaridan basinc uygulanmadan bile metallerin kirlilma toklugunu ve kirlilganligi azaltarak catlaklar ve kabarciklar seklinde hidrojen hasarina neden olacaktır.

5.3. COPPER AND COPPER ALLOYS

- 5.3.1. *Copper and copper-rich alloys are usually not susceptible to hydrogen embrittlement unless they contain oxygen or copper oxide.*
- 5.3.2. *When oxygen-bearing copper and copper alloys are annealed or heated in a hydrogen environment, the atomic hydrogen diffuses into the metals and reacts with the copper oxide or the oxygen to form water, which is converted to high-pressure steam if the temperature is above 375 °C (705 °F).*
- 5.3.3. *This is a classic example of HRE, as the steam will induce hydrogen damage in the form of fissures and blisters, decreasing the fracture toughness and ductility of the metals even without the application of external pressure.*

5.4. NIKEL VE NIKEL TEMELLI ALISIMLAR

- 5.4.1. Nikel ve nikel esasli alasimler yuksek sicaklik dayanimi, oksidasyon ve sicak korozyon direnci acisindan iyi ozelliklere sahiptir.
- 5.4.2. Ancak kuru oksidasyona ve kimyasal olarak asindirici bir ortama karsi iyi derecelendirmelere sahip nikel bazli bir alasimin otomatik olarak HE'ye karsi da bagisik oldugu anlamina gelmez.
- 5.4.3. Saf nikel, bir element olarak hidrojen tarafından ciddi sekilde kirlilganlasir; bu nedenle nikel-bakir, nikel-demir, nikel-kobalt ve nikel-tungsten gibi nikel acisindan zengin bir bilesime sahip cogu ikili alisimin da nikel acisindan zengin bolgelerde hidrojen tarafından oldukca kirlilganlastigi bulunmustur.

5.4. NICKEL AND NICKEL-BASED ALLOYS

- 5.4.1. *Nickel and nickel-based alloys have good properties for high-temperature strength, oxidation, and hot corrosion resistance.*
- 5.4.2. *However, a nickel-based alloy that has good ratings for dry-oxidation and a chemically corrosive environment does not automatically mean that it is also immune to HE.*
- 5.4.3. *As an element, pure nickel is severely embrittled by hydrogen; therefore, most binary alloys with a nickel-rich composition, such as nickel-copper, nickel-iron, nickel-cobalt, and nickel-tungsten, are also found to be highly embrittled by hydrogen in the nickel-rich regions.*

5.5. TITANYUM VE TITANYUM ALISIMLAR

- 5.5.1. Genel olarak, titanyum ve titanyum alisimleri sulu ortamda ustun korozyon direnci ozelliklerine sahiptir.
- 5.5.2. Bu ustun korozyon direnci ozelligi, oksitleyici kosullar altinda havada ve suda dogal olarak olusan ince, kararli ve direncli bir titanyum oksit (TiO_2) filminden kaynaklanmaktadır.
- 5.5.3. Bununla birlikte, bir baski akimindan asiri katodik sarj altinda, bu titanyum alasimleri bazilarinda sulu ortamda hidrojen gevreklesmesi gozlemlenmistir.
- 5.5.4. Titanyum uzerinde dogal olarak olusan TiO_2 filmi, dusuk - orta katodik sarj kosullari altinda hidrojen alimini etkili bir sekilde engelliyor gibi gorunmektedir. Bununla birlikte, yuksek katodik sarj akimi yogunluklari altinda, bu koruyucu film parcalanabilir ve titanyum alasimleri icin koruyucu olmaktan cikabilir ve atomik hidrojenin malzemelerin buyuk kismina etki etmesine izin verecektir.

5.5. TITANIUM AND TITANIUM ALLOYS

- 5.5.1. *In general, titanium and its alloys usually have excellent corrosion resistance properties in aqueous environment.*
- 5.5.2. *This superior corrosion resistance property is due to a thin, stable, and tenacious titanium-oxide (TiO_2) film that naturally forms in air and water under the oxidizing conditions.*
- 5.5.3. *However, under excessive cathodic charging from an impressed current, hydrogen embrittlement has been observed for some of these titanium alloys in aqueous media.*
- 5.5.4. *The naturally formed TiO_2 film on titanium appears to inhibit hydrogen uptake effectively under low-to-moderate cathodic charging conditions. However, under high cathodic charging current densities, this protective film can break down and become non-protective for titanium alloys and will allow atomic hydrogen to penetrate into the bulk of the materials.*

5.6. SUPER ALISIMLAR

- 5.6.1. Nikel bazli super alasimler, kati cozelti veya cokelme ile guclendirilmis olabilen en karmaşik mikro yapıya sahiptir.

5.6. SUPERALLOYS

- 5.6.1. *Nickel-based superalloys have the most complex microstructure, which can be either solid solution or precipitation strengthened.*

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025	Does Not Contain ITAR Controlled Data
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025	Cancelled Revision 01

- 5.6.2.** Nikel bazlı alaslmlar icin diger super alasim turlerinden daha fazla **HEE** endeksi verisi mevcuttur.
- 5.6.3.** Demir bazlı super alasimların kokeni ostenitik paslanmaz celiklerdir ve matrisin hem kati cozelti sertlestirme hem de cokelti olusturan elementlerle birlestirilmesi ilkesine gore gelismistir.
- 5.6.4.** Demir bazlı super alasimlar icin temel ozellik, ostenitik matrisin nikel ve demirden yapilmis olmasi ve **FCC** fazini stabilize etmek icin en az 25% Ni icermesidir. Bu nedenle demir bazlı super alasimlara nikel-demir bazlı super alasimlar da denir.
- 5.6.5.** Kobalt bazlı super alasimların mikro yapisi nikel bazlı alasimlardan daha az karmasiktir. Cogu kobalt alasimi gama-prime guclendirme fazi olusturmaz ve kati-cozelti ostenitik matris **FCC** kombinasyonuna baglidir ve en onemlisi sert karbur parcaciklarını guclendirme mekanizmaları olarak olustururlar.
- 5.6.6.** Bu uc tip super alasim icin urun formlari genellikle dokum veya dovme olarak siniflandırilir. Super alasim isil islemindeki ve urun formundaki farkliliklar **HE** derecesi uzerinde etkili olabilir.

6. HIDROJEN GEVREKLIGI INDEX DEGERI

- 6.1.** Hidrojen gevrekligi index orani, hidrojen ortamında test edilen bir malzemenin mekanik ozelliklerini hidrojenli ozellikleriyle karsilastiran hesaplanmış bir degerdir.
- 6.2.** Esasen, malzemenin kirliliginin hidrojenin varligi nedeniyle ne kadar azaldigini gosterir; daha yuksek bir oran, hidrojen gevreklesmesine karsi daha fazla duyarlilik anlamina gelir.
- 6.3.** Oran, genellikle hidrojenle test edilen bir numunenin alan azalmasinin (**RA**) hidrojenli test edilen bir numunenin **RA**'siyle karsilastirilmesiyle hesaplanır ve yuzde olarak ifade edilir.
- 6.4.** Farkli bir acidan soylenirse, gaz halindeki hidrojen ortamında helyum veya havaya kiyasla test edilen **NTS**, **RA** ve **EL** icin ozellik orani, genellikle **HEE Indexi** olarak kullanilir.
- 6.5.** **HEE Index** degerine bagli olarak, **HE** 5 kategoriye ayrilir, bu kategoriler hammaddenin hidrojen basinci altında dayanım gucunu gosterir.

- 5.6.2.** More **HEE** index data are available for nickel-based alloys than any other types of superalloys.
- 5.6.3.** Iron-based superalloys have their origin of development from austenitic stainless steels, and they are evolved on the principle of combining the matrix with both solid-solution hardening and precipitate-forming elements.
- 5.6.4.** The key feature for Iron-based superalloys is that the austenitic matrix is made from nickel and iron, with at least 25% Ni to stabilize the **FCC** phase. For this reason, iron-based superalloys are also called the nickel-iron based superalloys.
- 5.6.5.** The microstructure for cobalt-based superalloys is less complex than nickel-based alloys. Most cobalt alloys do not form gamma-prime strengthening phase, and they depend on the combination of solid-solution austenitic matrix **FCC**, and most importantly form the hard-carbide particles as strengthening mechanisms.
- 5.6.6.** The product forms for these three types of superalloys are commonly classified into cast or wrought. The differences in superalloy heat treatment and product form can have an effect on the degree of **HE**.

6. HYDROGEN EMBRITTLEMENT INDEX RATIO

- 6.1.** A hydrogen embrittlement index ratio is a calculated value that compares the mechanical properties of a material tested in a hydrogen environment to its properties without hydrogen.
- 6.2.** It essentially indicates how much the material's ductility is reduced due to the presence of hydrogen, with a higher ratio signifying greater susceptibility to hydrogen embrittlement.
- 6.3.** The ratio is typically calculated by comparing the reduction in area (**RA**) of a specimen tested with hydrogen to the **RA** of a specimen tested without hydrogen, expressed as a percentage.
- 6.4.** To put it in a different way, the property ratio for **NTS**, **RA**, and **EL**, tested in a gaseous hydrogen environment as compared to helium or air, is commonly used as the **HEE Index**.
- 6.5.** Depending on the **HEE Index** value, **HE** is divided into 5 categories, these categories show the strength of the raw material under hydrogen pressure.

HE CATEGORY	HEE INDEX	NOTES
Onemsiz <i>Negligible</i>	1,0 – 0,97	Malzemeler, hidrojenle kirlilme mekanigi ve catlak buyume analizi ile belirtilen hidrojen basinc ve sicaklik araliginda kullanılabilir.
Kucuk <i>Small</i>	0,96 – 0,90	Materials can be used in the specified hydrogen pressure & temperature range with fracture mechanics & crack growth analysis in hydrogen.
Yuksek <i>High</i>	0,89 – 0,70	Sadece hidrojenle ayrirtili kirlilme mekanigi ve catlak buyume analizi ile sinirli uygulamalar icin dikkatli kullanin. Cautiously use only for limited applications with detailed fracture mechanics & crack growth analysis in hydrogen.
Siddetli <i>Severe</i>	0,69 – 0,50	HEE Indexi olculdugu belirli basinc ve sicaklikta kullanilmasi onerilmez.
Asiri <i>Extreme</i>	0,49 – 0,00	Not recommended for usage at specific pressure and temperature where the HEE Index is measured.

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025	Does Not Contain ITAR Controlled Data
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025	Cancelled Revision 01

HSF Bunyesinde Kullanilan Bazi Hammaddelere Bagli Olarak, 24 °C (75.2 °F)'de ve Belirli Hidrojen Basincinda Test Edilmis Hammaddelerin Siniflandirilmesi

Classification of Raw Materials Tested at 24 0C (75.2 0F) and Specific Hydrogen Pressure, Depending on Some of the Raw Materials Used in HSF

Material	Hydrogen Pressure (MPa)	HE Category	HE INDEX			Kirilganlik (%) Ductility (%)		Cekme Dayanimi Degerleri (MPa) Tensile Strength Values (MPa)		
			NTS	EL	RA	EL	RA	NTS	YS	UTS
Inconel 718 (ST 954 °C 1750 °F)	34.5	EXTREME	0.53	0.24	0.34	20.8	29.5	1723	1102	1364
Inconel 718 (ST 954 °C 1750 °F)	68.9	EXTREME	0.46	0.09	0.08	17	26	1888	1254	1426
Inconel 718 (ST 1037 °C 1900 °F)	34.5	SMALL	0.92	0.87	0.76	26	50.6	2081	1075	1295
Inconel 625	34.5	HIGH	0.76	0.36	0.36	55	50	1433	634	992
Rene 41	34.5	EXTREME	0.36							
Rene 41	68.9	EXTREME	0.27	0.20	0.38	21	29	1929	1123	1350
Udimet 720	34.5	EXTREME	0.53					1771		
Udimet 700	51.7	SEVERE	0.65							
A286 (ST 893 °C 1640 °F)	68.9	NEGLIGIBLE	0.97	1.10	0.98	26	44	1605	847	1089
A286 (ST + AGED)	68.9	SEVERE			0.51					
Incoloy 901	34.5	SEVERE	0.60		0.40		21	1688		
Incoloy 903 (ST only)	34.5	NEGLIGIBLE	0.98	1.00	0.96		42	2122		
Haynes 188	48.2	HIGH	0.92		0.63		63	1130		
MP35N	24	HIGH	0.73					2425	1385	1433
MP35N	34.5	HIGH	0.70		0.85	23	58	2425	1385	1433
MP159	24	HIGH	0.66					2253	1895	1922
MP159	34.5	SEVERE	0.63			7	31	2253	1895	1922
Hastelloy X	34.5	HIGH	0.86	0.98	0.98	54	63	1006	317	717
Haynes 230	34.5	HIGH	0.76		0.41			1068	365	827
Haynes 242	34.5	HIGH	0.77		0.20			1860	861	1337
17-4 PH	68.9	EXTREME		0.18		6.4			1075	1144
17-7 PH	68.9	EXTREME	0.23	0.10	0.06	17	45	2081	1034	1130
H11	68.9	EXTREME	0.25	0.00	0.00	8.8	30	1736	1681	2060
4340 (900 °C 1652 °F Austenitize)	34.5	EXTREME	0.35	0.31	0.26	12.4	54.2	2157	1302	1371
4140 (Q&T)	68.9	EXTREME	0.25	0.19	0.19			2494	1233	1571
4140	34.5	EXTREME	0.47							

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025			Does Not Contain ITAR Controlled Data				
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025			Cancelled Revision	01			

4140	68.9	EXTREME	0.40	0.18	0.18	14	48	2157	1233	1282
4140 (NORMALIZED)	68.9	HIGH	0.85					1660		930
1020	68.9	HIGH	0.79	0.80	0.66	40	68	723	282	434
NITRONIC 40	68.9	HIGH		0.89	0.80	65	74		434	744
NITRONIC 50	68.9	NEGLIGIBLE		1.00	1.00	51	67		586	937
NITRONIC 32	68.9	SEVERE		0.64	0.47	75	78		482	861
316	68.9	NEGLIGIBLE	1.00	0.95	1.04	59	72	1109	441	648
321	34.5	HIGH	0.88	0.83	0.90	77	66	779	200	579
347	34.5	SMALL	0.92	1.00	1.00	38	70	1178	455	689
310	68.9	SMALL	0.93	1.00	0.96	56	64	799	220	531
304L	68.9	HIGH	0.87	0.92	0.91	86	78	703	165	531
AL 2011	68.9	NEGLIGIBLE		1.01	0.94	57	18		227	296
AL 2024	68.9	NEGLIGIBLE		0.95	0.97	19	36		324	441
AL 5086	68.9	NEGLIGIBLE		1.05	1.03	20	55		193	303
AL 6061 T6	68.9	NEGLIGIBLE	1.07	1.00	1.08	19	61	496	227	269
AL 6063	68.9	NEGLIGIBLE		1.00	1.01	15	83		158	193
AL 7039	68.9	NEGLIGIBLE		1.00	1.01	14	85		152	179
AL 7075 T73	68.9	NEGLIGIBLE	0.98	0.80	0.94	15	37	799	372	455
Titanium (Pure)	68.9	SMALL	0.95	0.96	1.00	32	61	868	365	434
Titanium (Annealed)	34.5	HIGH	0.89	0.90	0.82	15	44	1426	1006	1040
Titanium (Annealed)	68.9	HIGH	0.79	1.00	1.00	15	48	1674	909	1075
Titanium	48.2	SEVERE	0.69							
Titanium	68.9	SEVERE	0.58	0.85	0.95	13	48	1571	1082	1130
Copper (OFHC)	68.9	NEGLIGIBLE	1.00	1.00	1.00	63	94	599	269	289
Aluminum Bronze	68.9	NEGLIGIBLE		1.02	1.05	48	67		220	599
70 – 30 Bronze	68.9	NEGLIGIBLE		0.98	1.20	59	70		124	365

7. “HE” ICIN ONLEME VE KONTROL METHODLARI

7.1. Hidrojen Gevrekligi için 3 ana faktörün hebsinin tamamıyla ortadan kaldırılması mümkün değildir. Ama bu üç ana faktörün etkileşim oranının değiştirilmesi veya azaltılması, ilgili hammadde için hidrojen zararının değiştirilmesi de mümkündür.

7. PREVENTION AND CONTROL METHODS FOR “HE”

7.1. It is not possible to fully eliminate all 3 main factors for Hydrogen Embrittlement. But it is also possible to change or reduce the interaction rate of these three main factors and change the hydrogen damage for the relevant raw material.

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025	Does Not Contain ITAR Controlled Data
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025	Cancelled Revision 01

- 7.2. Bu üç faktörden yalnızca birini azaltarak birçok hassas malzeme için hidrojen hasar verici etkilerini değiştirmek mümkündür.
- 7.3. Pratikte, bu üç etkili faktörden yalnızca birini tamamen ortadan kaldırmak veya ortadan kaldırmak genellikle zordur; bu nedenle, üç faktörün de etkisini azaltmak için en iyi şekilde ise yarayacak yöntemlerin bir kombinasyonunu bulmak tavsiye edilir.
- 7.4. Aşağıda malzeme türünü, hidrojen ortamını ve uygulanan gerilimi kontrol etmeye yönelik birkaç pratik teknik kısaca önerilmektedir.

Bu kısımda verilen öneriler sadece HSF politikaları için geçerlidir, online ziyaretçilerin bu önerileri uygulamasından veya uygulamalarının sonuçlarından kendileri sorumludur.

- 7.4.1. Uygun Hammaddeleri Seçin,
7.4.2. Korozyon Ortamları İçin Uygun Çelikleri Seçin,
7.4.3. Uygun Isıl İşlem Prosedürünü Seçin,
7.4.4. Hidrojen Gazı Basıncını Azaltın,
7.4.5. Hidrojen Gazı Safliğini Azaltın,
7.4.6. Kaplama Sonrasında, Aksi Teknik Sarınamede Veya İlgili Kaplama Standardında Belirtilmediği Surece, En Fazla 4 saat içinde Kaplama Standardında Belirtilen Surelere Bağlı Olarak hidrojen Gevrekliği Giderme Firinlama Surecini Uygulayın,
7.4.7. Gaz Halindeki Hidrojen Ortamında Malzeme Soguma Oranını Azaltın,
7.4.8. Uygun Kaplama ve/veya Yağlama Prosedürünü Seçin,
7.4.9. Ultrasonic, Vapor veya direkt solventle yüzey hazırlama süreçlerinde ürünleri maksimum 1 saat tutun.
7.4.10. Ultrasonic, Vapor veya direkt solventle yüzey hazırlama süreçlerinde temizleyici oranını yüzey hassasiyetine bağlı olarak artırıp, temizlik süresi kısaltılabilir.
7.4.11. Ultrasonic, Vapor veya direkt solventle yüzey hazırlama süreçlerinde çıkan ürünleri duruladıktan sonra yüzey suyu atımı için silkelenip en az 2 saat süre ve 195 °C (383 °F) sıcaklıkta kurutma firinına alınmalı.
7.4.12. Hidrojen Giderimi Uygulayın,
7.4.13. Uygun Calisma Sıcaklığını Seçin,
7.4.14. Harici Uygulanan Gerilimi Azaltın,
7.4.15. Dahili Kalan Gerilimi Azaltın,
7.4.16. Uygun Kaynak Prosedürlerini Kullanın

- 7.2. By reducing only one of these three factors, it is possible to alter the hydrogen damaging effects for many susceptible materials.
- 7.3. In practice, it is often difficult to be able to completely eliminate or remove only one of these three influential factors; therefore, it is advisable to find a combination of methods that would work best for reducing the influence of all three factors.
- 7.4. A few practical techniques for controlling the material type, hydrogen environment, and applied voltage are briefly suggested below.

The suggestions given in this section are valid only for HSF policies, online visitors are responsible for their own implementation of these suggestions and the consequences of their implementation.

- 7.4.1. Select Proper Raw Materials,
7.4.2. Select Proper Steels for the Corrosive Environment,
7.4.3. Select Proper Heat Treatment Procedure,
7.4.4. Reduce Hydrogen Gas Pressure,
7.4.5. Reduce Hydrogen Gas Purity,
7.4.6. At the Post-Coating, Apply the Hydrogen Embrittlement Removal Baking Process Within a Maximum of 4 Hours, Depending on the Times Specified in the Coating Standard, Unless Otherwise Specified in the Technical Specifications or the Relevant Coating Standard,
7.4.7. Reduce Material Cooling Rate in Gaseous Hydrogen Environment,
7.4.8. Select Proper Coating and/or Lubrication Procedure,
7.4.9. In ultrasonic, vapor or direct solvent surface treatment processes, keep the products for a maximum of 1 hour,
7.4.10. In ultrasonic, vapor or direct solvent surface preparation processes, the cleaner amount can be increased depending on the surface sensitivity and the cleaning time can be shortened.
7.4.11. After rinsing the products obtained during the ultrasonic, vapor or direct solvent surface treatment processes, they should be shaken to remove surface water and placed in the drying oven for a minimum 2 hours at 195 °C (383 °F).
7.4.12. Hydrogen Relief by Bake Out,
7.4.13. Select Proper Operating Temperature,
7.4.14. Reduce External Applied Stress,
7.4.15. Reduce Internal Residual Stress,
7.4.16. Use Proper Welding Procedures

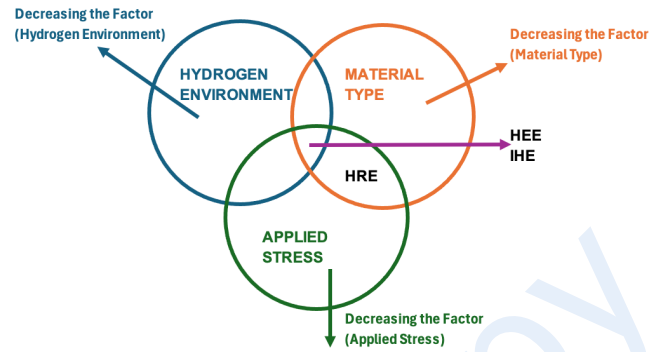
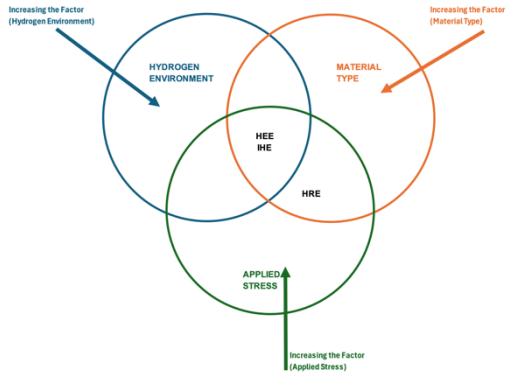
3 Ana Faktörün Birlikte ve/veya Birinin Oransal Olarak **Artışının** Hidrojen Zararına Etkisi
Effect of 3 Main Factors Together and/or Proportional Increase of One on Hydrogen Damage

3 Ana Faktörün Birlikte ve/veya Birinin Oransal Olarak **Azalmasının** Hidrojen Zararına Etkisi
Effect of 3 Main Factors Together and/or Proportional Decrease of One on Hydrogen Damage

AWARENESS & TRAINING DOCUMENT

HIDROJEN GEVREKLIGI HYDROGEN EMBRITTLEMENT

Document Number	HSF-TrainingE3	First Release Date	02.01.2025	Does Not Contain ITAR Controlled Data
Revision Number	01	Revision Date	30.07.2025	Cancelled Revision 01



Uncontrolled Copy