


UO‘K: 669.14:621.791:669.018

 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.13

KARBONLI PO‘LATLARDA YUQORI HARORATLI VODOROD TA’SIRI (HTHA), MIKROSTRUKTURAVIY DEGRADATSIYA, ZARAR YETKAZISH MEKANIZMI VA TEXNOLOGIK OLDINI OLISH USULLARI



Azimov Salohiddin Turamurodovich

“O‘zbekiston GTL” MChJ nazoratchi muhandisi, t.f.f.d.,
Qarshi, O‘zbekiston
E-mail: salohiddin.azimov1989@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-9122-8463



Raximov G‘anisher Baxtiyorovich

Qarshi davlat texnika universiteti, dotsenti, t.f.f.d., Qarshi,
O‘zbekiston
E-mail: ganisher.raximov1@inbox.ru
ORCID ID: 0009-0004-1970-1541

Annotatsiya. Yuqori haroratli vodorod ta’siri (HTHA – High-Temperature Hydrogen Attack) neft-gaz, kimyo va energetika sanoatlarida keng qo‘llaniladigan uglerodli va past qotishmali po‘latlarning xizmat muddatini sezilarli darajada qisqartiruvchi xavfli degradatsiya jarayonidir. Ushbu maqolada HTHA mexanizmi, unga moyil materiallar va ularning mikrostrukturaviy o‘zgarishlari, payvand choklarida va issiqlik ta’sir zonalarida yuzaga kelish holatlari batafsil tahlil qilinadi. Tadqiqotda ASME RP 941, API RP 571 va boshqa xalqaro standartlar asosida xavfsiz ishlash chegaralari, material tanlash strategiyalari hamda zamonaviy no-destruktiv sinov (NDE) usullarining samaradorligi o‘rganildi. Shuningdek, HTHA xavfini kamaytirish uchun qotishma elementlari bilan boyitilgan po‘latlardan foydalanish, payvanddan keyingi issiqlik ishlovi (PWHT) qo‘llash va qoplama texnologiyalarining metallurgik mosligi tahlil qilindi. Olingan natijalar asosida sanoat korxonalarida HTHAni erta aniqlash va oldini olish bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqildi.

Kalit so‘zlar: HTHA, vodorod, yuqori harorat, karbonli po‘lat, payvandlash, mikrostrukturaviy degradatsiya, metallurgik nomutanosiblik, RP 941.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВОДОРОДНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ (HTHA) НА УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ, МИКРОСТРУКТУРНАЯ ДЕГРАДАЦИЯ, МЕХАНИЗМ ПОВРЕЖДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

Азимов Салохиддин Турамурадович

Ведущий инженер ООО «Uzbekistan GTL», доктор
философских наук, г. Карши, Узбекистан

Рахимов Ганишер Бахтиёрович

Каршинский государственный технический университет,
доцент, доктор философских наук, Карши, Узбекистан

Аннотация. Высокотемпературное воздействие водорода (HTHA – High-Temperature Hydrogen Attack) является опасным процессом деградации, значительно сокращающим срок службы углеродистых и низколегированных сталей, широко применяемых в нефтегазовой, химической и энергетической промышленности. В статье подробно рассмотрены механизм HTHA, материалы, подверженные данному явлению, микроструктурные изменения, а также случаи возникновения в сварных швах и зонах термического влияния. На основе международных стандартов ASME RP 941, API RP 571 и других изучены безопасные условия эксплуатации, стра-

тегии выбора материалов и эффективность современных методов неразрушающего контроля (NDE). Проведен анализ влияния легирующих элементов, применения термообработки после сварки (PWHT) и технологии нанесения покрытий на металлургическую совместимость. Полученные результаты позволили сформулировать практические рекомендации по раннему выявлению и предотвращению HTHA на промышленных объектах.

Ключевые слова: HTHA, водород, высокая температура, углеродистая сталь, сварка, микроструктурная деградация, металлургическая несовместимость, RP 941.

HIGH-TEMPERATURE HYDROGEN ATTACK (HTHA) IN CARBON STEELS, MICROSTRUCTURAL DEGRADATION, DAMAGE MECHANISM, AND TECHNOLOGICAL PREVENTION METHODS

Azimov Salohiddin Turamuradovich

Leading Engineer of Uzbekistan GTL LLC, Doctor of Philosophy,
Karshi, Uzbekistan

Rakhimov Ganisher Bakhtiyorovich

Karshi State Technical University, Associate Professor, Doctor of
Philosophy, Karshi, Uzbekistan

Abstract. High-Temperature Hydrogen Attack (HTHA) is a critical degradation phenomenon that significantly reduces the service life of carbon and low-alloy steels widely used in the oil and gas, chemical, and power industries. This paper provides a comprehensive analysis of the HTHA mechanism, susceptible materials, microstructural changes, and its occurrence in welds and heat-affected zones. Based on international standards such as ASME RP 941, API RP 571, and others, safe operating limits, material selection strategies, and the effectiveness of modern non-destructive examination (NDE) methods are discussed. The study also examines the role of alloying elements, the application of post-weld heat treatment (PWHT), and cladding technologies in improving metallurgical compatibility. The findings have been used to develop practical recommendations for early detection and prevention of HTHA in industrial equipment.

Keywords: HTHA, hydrogen, high temperature, carbon steel, welding, microstructural degradation, metallurgical incompatibility, RP 941.

Kirish. Yuqori haroratli vodorod ta'siri (HTHA — High-Temperature Hydrogen Attack) — bu po'lat materiallarning yuqori harorat va bosim ostida vodorod gaziga duchor bo'lishi natijasida yuzaga keladigan zararli jarayondir. Ushbu sharoitda dissotsiatsiyalangan vodorod atomlari po'latdagi uglerod va karbidlar bilan kimyoviy reaksiyaga kirishib, metan (CH₄) hosil qiladi.

Vodorod va uglerod o'rtasidagi bu reaksiyaning natijalaridan biri — po'lat sirtining uglerodsizlanishi (dekarburizatsiyasi) bo'lishi mumkin. Sirt dekarburizatsiyasi, odatda, uskuna-ning xizmat muddatini cheklaydigan darajada zararli hisoblanmaydi, biroq bu holat ichki HTHA jarayonining mavjudligidan darak berishi mumkin. Keng ko'lamdagi dekarburizatsiya esa komponentning mustahkamligini sezilarli darajada pasaytiradi.

Agar uglerodning yuzaga qarab diffuziyasi cheklangan bo'lsa, u holda ichki dekarburizatsiya

natijasida po'latning o'zida CH₄ hosil bo'ladi. CH₄ molekulari po'lat orqali diffuziyalana olmaydi, shu sababli ichki bosim ortib boradi. Bu esa dastlab pufakchalar yoki bo'shliqlar, keyinchalik mikro-yoriqlar, nihoyat esa yoriqlar hosil bo'lishiga olib keladi. Ushbu ichki zararlar va yoriqlarning rivojlanishi HTHAning eng xavfli natijasi hisoblanadi va uskunaning ishdan chiqishiga olib kelishi mumkin.

Bunday yoriqlar bosimni ushlab turuvchi elementlarning yuk (bosim) ko'tarish qobiliyatini pasaytiradi va bu holat uskuna ishdan chiqishiga sabab bo'ladi.

Blisterlash (po'lat yuzasida shishish) holatlari ham kuzatilishi mumkin. Bu holat qayta birlashgan vodorod atomlaridan hosil bo'lgan molekulyar vodorod yoki CH₄ gazining po'latdagi laminatsiyalar yoki boshqa qulay joylarda to'planishi natijasida yuzaga keladi.

Dekarbonizatsiya: Qozon quvurlarida

HTHAning bir ko‘rinishi yuzaga kelishi mumkin bo‘lib, u issiqlik elektr stansiyalari sanoatida vodorodli shikastlanish (hydrogen damage) deb ataladi.

Bu holatda uglerodning metal yuzasidan yoki ichki qatlamlaridan chiqib ketishi natijasida po‘latning mexanik xossalari yomonlashadi, bu esa quvurlar yoki uskunalarning ishdan chiqish xavfini oshiradi.

Tadqiqot metodikasi va materiallar.

Po‘latdagi qotishma elementlari (xususan xrom – Cr va molibden – Mo) miqdori oshgani sayin, materialning yuqori haroratli vodorod ta‘siriga (HTHA) chidamliligi oshadi. Muayyan material uchun HTHAga duchor bo‘lish ehtimoli harorat, vodorodning qisman bosimi, ta‘sir muddati va stress (yuklanish) darajasiga bog‘liq.

Uglerodli va past qotishmali po‘latlar uchun harorat va vodorodning qisman bosimi o‘rtasidagi xavfsiz ishlash chegaralarini ko‘rsatadigan grafiga egri chiziqlar to‘plami (1-rasm). Ma‘lum bir material uchun egri chiziqdan pastda joylashgan harorat va H₂ bosimida ishlash xavfsiz deb hisoblanadi. Aksincha, egri chiziqdan yuqori sharoitlarda ishlash esa HTHA xavfini bildiradi.

HTHADan zarar ko‘rishdan oldin, hech qanday fizik yoki mexanik xossalardagi o‘zgarishlar kuzatilmaydigan, shuningdek, mavjud bo‘lgan NDE (no-destructive examination – buzilmasdan sinov) usullari bilan ham ichki shikastlanish aniqlanmaydigan vaqt oralig‘i mavjud. Bu vaqt “inkubatsiya davri” deb ataladi.

Inkubatsiya davri davomida material ichida bo‘shliqlar va mikroyoriqlar asta-sekin hosil bo‘lib, ularning o‘shishi inspeksiya usullari orqali aniqlanishi va o‘lchanishi mumkin bo‘lgan darajaga yetadi. Bu davr juda og‘ir ish sharoitida bir necha soatni tashkil qilishi mumkin bo‘lsa, yengil sharoitlarda esa yillar davom etishi mumkin.

HTHADan kelib chiqadigan shikastlanish qaytarilmaydi (irreversibel) va xizmat davomiyligi mobaynida to‘planib boradi. Inkubatsiya davridan so‘ng, material zararli harorat va H₂ bosimi sharoitida qolgan har bir lahza davomida, u uzluksiz yoki davriy bo‘lishidan qat‘i nazar, shikastlanish chuqurlashishda davom etadi.

Tashqi yoki qoldiq cho‘zuvchi stresslar (ya‘ni tortuvchi kuchlanishlar) HTHA ta‘sirining kuchayishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun

uglerodli po‘lat payvand chokklarini PWHT (issiklik bilan ishlov) orqali stressdan xalos qilish — HTHAga chidamlilikni oshirishda samarali chora hisoblanadi.

Yuqoridan pastga qarab qarshilik darajasi ortib borish tartibida quyidagi materiallar yuqori haroratli vodorod ta‘siriga (HTHA) nisbatan ta‘sirchan hisoblanadi:

- Payvandlangan, lekin PWHT (post-weld heat treatment – payvanddan keyingi issiqlik bilan ishlov) o‘tkazilmagan uglerodli po‘latlar (eng zaif);
- Payvand qilinmagan uglerodli po‘latlar;
- PWHT qo‘llanilgan uglerodli po‘latlar;
- C–0.5Mo (uglerod–molibdenli po‘lat);
- Mn–0.5Mo (marganes–molibdenli po‘lat);
- 1Cr–0.5Mo;
- 1.25Cr–0.5Mo;
- 2.25Cr–1Mo;
- 2.25Cr–1Mo–V;
- 3Cr–1Mo;
- 5Cr–0.5Mo va kimyoviy tarkibida o‘xshash farqlarga ega boshqa qotishma po‘latlar;
- Austenitik zanglamaydigan po‘latlar (300 series): HTHA ta‘siriga juda chidamli;
- Inconel (UNS N06625) kabi Nikel asosli qotishmalar maksimal chidamlilikka ega.

Uskunaning qaysi qismida HTHA yuzaga kelishi oldindan aniq prognoz qilib bo‘lmaydi. HTHA natijasida uskunaning ishdan chiqishi yoki almashtirilishiga sabab bo‘lgan holatlar payvand chokining issiqlik ta‘siriga uchragan zonalarida (HAZ – Heat Affected Zone) va payvanddan uzoqda joylashgan asosiy metallning o‘zida aniqlangan. HTHA holatlari payvand metalining o‘zida esa nisbatan kamroq uchraydi.

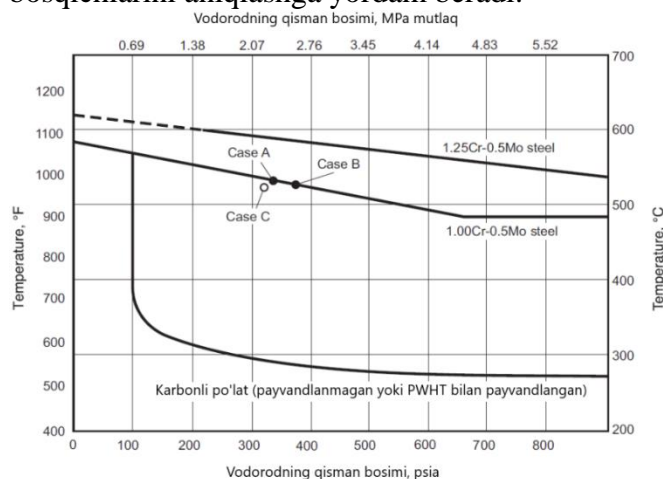
HTHA mavjudligini maxsus tekshiruv usullari yordamida aniqlash mumkin, xususan: metallografik tahlil va SEM (Scanning Electron Microscopy – skanerlovchi elektron mikroskopiya) zararlangan sohalarda qo‘llaniladi.

Po‘latning sirtida uglerodsizlanish (dekarburizatsiya) holati kuzatilishi mumkin.

Ichki dekarburizatsiya natijasida ichki yoriqlar va darzlar hosil bo‘lishi mumkin. Zararning kech bosqichlarida bular standart metallografiya usullari bilan aniqlanadi.

HTHAning eng dastlabki bosqichlarida, namunalar ichida pufakchalar yoki bo‘shliqlar mavjudligini SEM yordamida aniqlash mumkin.

Biroq bu bosqichda HTHA bo'shliqlari bilan surilish (creep) natijasida hosil bo'lgan bo'shliqlarni farqlash qiyin bo'lishi mumkin (Ayrim neftni qayta ishlash xizmatlarida past qotishmali po'latlar HTHA va creep sharoitlariga birgalikda duchor bo'ladi). Zararlangan zonalarining ilg'or metallografik tahlili HTHAning dastlabki mikroyoriqlanish bosqichlarini aniqlashga yordam beradi.

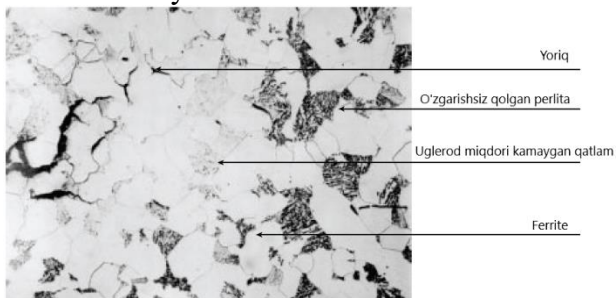


1-rasm. Yuqori haroratli vodorod ta'sirida bo'lgan 1,25Cr-0,5Mo po'latlarning ishlash sharoitlari.

HTHA natijasida hosil bo'ladigan yoriqlar va darzlar odatda intergranulyar (donalararo) xarakterga ega bo'lib, ular uglerodli po'latdagi perlit (ferrit va temir karbid qatlamlari) joylashgan hududlar atrofida rivojlanadi.

Uglerodli po'latda mahalliy HTHA ta'siri natijasida HAZ (issiqlik ta'sir zonasi) va payvandlash chizig'i (fusion line) bo'ylab yoriqlar paydo bo'lishi mumkin, hatto bu zonalar yaqin joylarda deyarli hech qanday darz yoki dekarburizatsiya belgilari kuzatilmagani mumkin.

Ayrim holatlarda blisterlash (shishish) hodisalari oddiy ko'z bilan ham ko'rinishi mumkin.



2-rasm. Po'lat uchun yuqori haroratli vodorod xizmatida ichki dekarburizatsiya va yoriqlarni ko'rsatadigan.

Tadqiqot natijalari va ularning muhokamasi. Vodorod ta'siri odatda API RP 941 nashrida belgilangan bosim-harorat chegaralarida ishlash sharoitida muammo tug'dirmaydi. Agar API RP 941 talab qilgan chegaralar oshib ketilsa yoki tasodifan noto'g'ri (qonuniy talablarga javob bermaydigan) past qotishmali materiallar qo'llansa, mikroyoriqlar hosil bo'lishi mumkin.

Barcha uskuna materiallari maxsus musbat identifikatsiyalash texnologiyalari (Positive Material Identification, PMI) yordamida tekshirilishi va ishlatilayotgan materiallarning to'g'riligi tasdiqlanishi kerak. Har qanday nomaqbul (mos kelmaydigan) material aniqlansa, u zudlik bilan almashtirilishi lozim.

Agar tekshiruv jarayonida yuqori haroratli vodorod ta'siridan kelib chiqqan mikroyoriqlar yoki yoriqlar aniqlansa, ushbu materiallar ham darhol almashtirilishi kerak.

2¼Cr-1Mo materiallari uchun uskunani API 941 grafigiga nisbatan kamida 14°C (25°F) xavfsizlik oralig'i bilan ishlatish tavsiya etiladi.

2¼Cr-1Mo-V po'latlarida esa maksimal ish harorati 468°C (874°F) bilan cheklanishi lozim. Biroq ko'plab amaliy holatlarda ushbu materiallardan tayyorlangan uskuna yoki quvurlar undan past haroratlarda ishlaydi.

Agar uskuna tasodifan API RP 941 grafigida ko'rsatilgan bosim/harorat chegaralaridan yuqori qiymatga duch kelgan bo'lsa, mikroyoriqlarni aniqlashga mo'ljallangan maxsus diagnostika usullari yordamida inspeksiya o'tkazilishi zarur.

Uskunaga ta'sir qiluvchi stress darajasi ASME standartlarida ruxsat etilgan maksimal qiymatlardan oshmasligi kerak.

Xrom (Cr) va molibden (Mo) bilan boyitilgan qotishma po'latlardan foydalanish karbidlarning barqarorligini oshiradi; bu metan (CH₄) hosil bo'lishining kamayishiga, natijada esa HTHAga nisbatan yuqori chidamlilikka olib keladi. Volfram (W) va vanadiy (V) ham karbidlarni barqarorlashtiruvchi muhim elementlar hisoblanadi.

API RP 941 grafigidan foydalanilganda odatda dizaynda qo'shimcha xavfsizlik omili sifatida 25°F-50°F (15°C-30°C) va 25 psia-50 psia (170 kPa-345 kPa) oralig'ida qo'shimcha zaxira qisman vodorod bosimi qo'llanadi.

Mavjud C-½Mo po'latdan tayyorlangan uskunalar uchun HTHAga bardoshlilik bo'yicha

noaniqlik korxonalarini inspeksiya samaradorligini, iqtisodiy tahlillarni va materialni yanada chidamli qotishmaga almashtirish zaruratini qayta ko'rib chiqishga majbur qilmoqda.

Stressdan xalos qilinmagan (PWHT o'tkazilmagan) uglerodli po'lat payvand choklari stressdan xalos qilingan (PWHT qilingan) yoki umuman payvandlashsiz bajarilgan konstruksiyalarga nisbatan HTHAga ancha ko'proq moyillik ko'rsatgan.

300-seriyali zanglamas po'lat (SS) bilan qoplangan payvand overlaylari yoki roll-bond cladding (yuza qatlamni bosim ostida biriktirish), shuningdek ayrim hollarda 400-seriyali SS cladding, yuqori haroratli vodorod muhiti sharoitida keng qo'llanadi — ayniqsa, asosiy metall yuqori haroratda H₂ yoki H₂S korroziyaga chidamli bo'lmaganda.

Zanglamas po'lat overlay yoki cladding texnologik jihatdan asosiy metall bilan metallurgik tarzda to'g'ri bog'langan bo'lsa, u asosiy metallga yetib boradigan vodorodning qisman bosimini kamaytiradi.

Biroq aksariyat neftni qayta ishlash zavodlari yangi uskuna loyihalash jarayonida bunday qoplamaning HTHAga qarshi qo'shimcha himoya ta'sirini hisobga olmaydi. Yangi uskuna loyihalalanayotganda u ishlash sharoitlariga ko'ra o'z-o'zidan HTHAga bardoshli bo'lishi, ya'ni qoplama yoki payvand overlay ta'minlaydigan qo'shimcha himoyaga tayanmasligi kerak.

Shunga qaramay, mavjud uskunalarni baholashda, ya'ni HTHA xavfini aniqlash jarayonida, ayrim korxonalar qoplamaning vodorodning ta'sirchan qisman bosimini pasaytiruvchi rolini inobatga oladi.

HTHA zararlanishi tasodifiy tarzda asosiy metall, payvand chokining issiqlik ta'sir zonalari (HAZ) yoki ba'zan payvand choklarining o'zida yuzaga kelishi mumkin.

HTHA asosiy metallning payvand choklaridan ancha uzoq hududlarda ham paydo bo'lishi ehtimoli mavjud. Ichki qoplama (cladding) yoki payvand overlay bilan jihozlangan idishlarda, agar bu qoplamalar yoriqlangan yoki asosiy metall yuzasidan ajralgan (disbonded) bo'lsa — ayniqsa API RP 941 grafigida himoyasiz asosiy metall uchun ko'rsatilgan chegaradan yuqori harorat/bosimda ishlagan bo'lsa — asosiy metal-

ning ichki qatlamlarida HTHA zarari yuzaga kelishi ehtimoli yuqori bo'ladi.

Qoplama yoki overlaydagi yoriqlarni PT (penetrant testi) yordamida aniqlash, uning ostida joylashgan asosiy metallning HTHAga uchragan bo'lishi mumkin bo'lgan hududlarini aniqlashga yordam beradi.

Qoplama yoki overlayning asosiy metall yuzasidan bo'rtib chiqishi (bulging) holatlarini vizual tekshiruv (VT) orqali aniqlash ham HTHA ehtimoli mavjud bo'lgan joylarni topishda foydalidir. Shuni unutmaslik kerakki, faqat payvand choklari yoki nozllarga qaratilgan inspeksiya ayrim lokal HTHA zonalarini e'tiborsiz qoldirishi mumkin.

FMR (Field Metallographic Replication) usuli mikrobo'shliqlar, darzlar va dekarburizatsiyani aniqlay oladi, ammo u faqat HTHA ehtimoli mavjud zonalarda qo'llash uchun mos bo'lib, asosiy aniqlovchi vosita sifatida tavsiya etilmaydi. Ko'p hollarda uskuna yuzalarida ishlab chiqarish jarayonidagi issiqlik ishlovlari sababli tabiiy dekarburizatsiya mavjud bo'lishi mumkin, shuningdek sirtlarda mikrobo'shliqlar yoki darzlar umuman uchramasligi ham mumkin. Amaliy tajriba ko'rsatadiki, HTHA zararlanishini aniqlash uchun ko'pincha 2 mm gacha (0.1 dyuym) metall qatlamini olib tashlash talab qilinadi.

Ichki yuzada blisterlar (shishlar) mavjudligini vizual tekshirish (VT) CH₄ hosil bo'lishi va ehtimoliy HTHAni ko'rsatishi mumkin. Biroq HTHA holatlarining aksariyati sirt blisterlari hosil bo'lmasdan rivojlanadi.

Ichki HTHAni aniqlashda NDE (buzilmasdan sinov) usullaridan foydalanish yuqori malaka, tajriba va maxsus tayyorgarlikni talab qiladigan murakkab jarayondir. Natijalar ba'zan barqaror bo'lmaydi va ushbu yo'nalish hali rivojlanish bosqichida hisoblanadi.

AUBT (Automated Ultrasonic Backscatter Testing) va ABSA (Angle Beam Spectral Analysis) ayrim holatlarda asosiy metall, payvand va HAZlarda darzlarni aniqlashda ijobiy natijalar ko'rsatgan. Biroq ular muhim yoriqlarni aniqlamay qolishi ham mumkin, shu sababli ishonchli usul sifatida tavsiya etilmaydi.

TOFD (Time of Flight Diffraction) va PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) sirt bilan bog'langan yoki ichki HTHA zararlanishlarini

aniqlashda istiqbolli texnologiyalar sifatida qaralmoqda.

An'anaviy yoriqlarni aniqlash usullari — WFMT (Wet Fluorescent Magnetic Particle Testing), PT (Penetrant Testing), MT (Magnetic Particle Testing) — HTHAni faqat jiddiy yoriqlar sirtga chiqib kelgan hollarda aniqlab bera oladi.

AET (Acoustic Emission Testing) HTHAni aniqlashda ishonchli usul sifatida tasdiqlanmagan.

Ultratovushli so'nish (attenuation) va tezlik nisbati (velocity ratio) usullari HTHAni aniqlashda ishonchsiz deb topilgan va asosiy tekshiruv vositasi

sifatida tavsiya etilmaydi.

Xulosa. HTHA – bu sanoat korxonalarida uzoq muddatli va xavfli ta'sir ko'rsatuvchi degradatsiya jarayonidir. Uning oldini olish uchun to'g'ri material tanlash, loyihalashda RP 941 talablariga rioya qilish, payvandlash texnologiyasiga alohida e'tibor berish va monitoring tizimlarini joriy etish zarur. Tadqiqotlar ko'rsatadiki, metallurgik muvofiqlikni ta'minlash va davriy texnik ko'riklar HTHA ni erta aniqlashda hal qiluvchi ahamiyatga ega.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] American Petroleum Institute. (2020). API Recommended Practice 571: Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry (3rd ed.). Washington, DC: American Petroleum Institute.
- [2] Vitovec, F. H., Covey, R. E., & Vance, J. M. (1964). The growth rate of fissures during hydrogen attack of steels. *Proceedings of the API Division of Refining*, 44(3), 179–188.
- [3] Materials Properties Council. (1995). Fitness-for-service evaluation procedures for operating pressure vessels, tanks, and piping in refinery and chemical service (FS-26, Draft No. 5). New York.
- [4] Decker, S., Young, D., & Anderson, W. (2009). Safe operation of a high temperature hydrogen attack affected DHT reactor. In *Corrosion/2009* (Paper No. 09339, 12 pp.). Houston, TX: NACE International.
- [5] American Petroleum Institute. (2016). API Recommended Practice 941: Steels for hydrogen service at elevated temperatures and pressures in petroleum refineries and petrochemical plants (8th ed.). Washington, DC: American Petroleum Institute.
- [6] ASME. (2021). Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Nondestructive examination (pp. 1–432). New York: ASME.
- [7] ASME. (2021). Boiler and Pressure Vessel Code, Section II-A: Ferrous material specifications (pp. 878–880). New York: ASME.
- [8] Ermatov, Z. D., Dunyashin, N. S., Galperin, L. V., & Yusupov, B. D. (2025). Welding of special steels and alloys (pp. 140–178). Tashkent: FAN.
- [9] Ющенко, К. А. (2004). Свариваемость и перспективные процессы сварки материалов. *Автоматическая сварка*, (9), 40–45.
- [10] Демченко, М. В., Сисанбаев, А. В., & Кузеев, И. Р. (2017). Исследования состояния сварного соединения металлов по параметрам деформационного и коррозионного рельефа поверхности. *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*, 9(5), 98–115.
- [11] Rakhimov, G. B. (2023). Development of anti-detonation additive. *Экономика и социум*, 12(115-1), 604–607.
- [12] Rakhimov, G. B., & Sayfiyev, E. K. (2024). Research of the process of producing alcohols based on by-products obtained in the Fischer–Tropsch synthesis. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 2(3).
- [13] Raximov, G. A. B. (2024). Qobiq-quvurlardan foydalangan holda issiqlik almashinish uskunasi samaradorligini oshirish uchun konstruksiyani takomillashtirish. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 2(3).
- [14] Rakhimov, G. (2023). Qobiq quvurli issiqlik almashinish qurilmalaridagi issiqlik almashinish samaradorligiga gidrodinamik parametrlarning ta'sirini o'rganish. *Innovatsion texnologiyalar*, 51(3), 77–86.