

УДК620.192.7

О.Цирульник¹, канд. техн. наук; І.Окіпний²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

²Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ВПЛИВ ВОДНЮ І ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА НАПРУЖЕННЯ СКОЛЮВАННЯ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ

Досліджено вплив водню і пластичного деформування комбінованим розтягом на напруження сколювання теплостійкої сталі 15Х2МФА ($\sigma_{0,2}=897$ МПа, $\sigma_b=1000$ МПа). Випробування проводили на циліндричних зразках з діаметром робочої ділянки 5 мм. Виявлено, що елекролітичне наводнювання зразків, коли метал спочатку наводнюється, а потім пластично деформується, напруження сколювання нижче як при статичному, так і комбінованому розтягу порівняно з недеформованим матеріалом.

Попередня пластична деформація (ППД) призводить до суттєвих змін механічних властивостей конструкційних сталей, в першу чергу, окрихчує матеріал, що проявляється в зменшенні видовження при розриві, підвищенні твердості, зниженні температури в'язко-крихкого переходу. Разом з тим ППД неоднозначно впливає на напруження сколювання $\sigma_{ск}$, збільшуючи або зменшуючи його в залежності від виду навантаження (квазістатичне, циклічне) і способу деформування (розтяг, стиск) тощо [1-3]. У випадку експлуатації сталей у воденьмістких середовищах важливо враховувати сумісний вплив наводнювання та ППД на їх механічну поведінку. При цьому спостерігається складний вплив пластичного деформування матеріалів на їх механічні властивості [4,5] і катастрофічне зниження статичної та циклічної тріщиностійкості за присутності водню [6]. Порушена проблема особливо актуальна для теплостійких реакторних сталей, що експлуатуються за складних умов механічного навантаження та дії агресивного робочого середовища і для яких високий опір крихкому руйнуванню є одним з основних показників роботоздатності. Важливим аспектом цієї проблеми є дослідження впливу комбінованого деформування (одновісний розтяг з накладанням низькоамплітудної циклічної складової) наводненого матеріалу на напруження сколювання, яке розглядають як характеристику опору крихкому руйнуванню.

Метою даної роботи є дослідження впливу ППД комбінованим розтягом у поєднанні з наводнюванням на напруження сколювання теплостійкої сталі після термообробки, що моделює радіаційне окрихчення корпусу реактора типу ВВЕР на середину служби експлуатації.

Методика дослідження

Хімічний склад і режими термообробки сталі 15Х2МФА наведені у праці [7]. Характеристики механічних властивостей сталі 15Х2МФА в діапазоні температур 293...573 К [2] подані в табл. 1.

Таблиця 1 - Характеристики механічних властивостей сталі 15Х2МФА

| T, К | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_b , МПа | δ , % | ψ , % |
|------|----------------------|------------------|--------------|------------|
| 293 | 897,0 | 1000,0 | 15,8 | 39,2 |
| 573 | 653,0 | 694,0 | 11,7 | 36,0 |

Вплив водню на напруження сколювання досліджували при деформуванні розтягом і комбінованим розтягом циліндричних зразків діаметром робочої ділянки 5 мм і базою 20 мм.

Зразки виготовляли з прямокутного бруса розміром 19×19×50 мм, який вирізався із темплету розміром 120×50×120 мм, який вирізався з обечайки (рис. 1, тут L – напрям прокату; S , T – відповідно ширина і довжина прокатної заготовки).

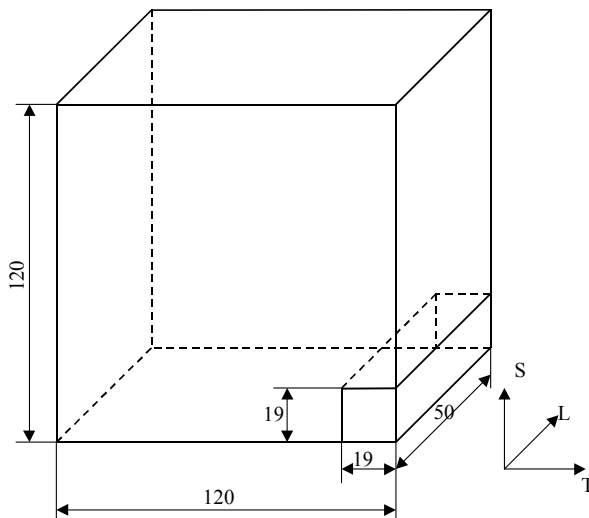


Рисунок 1 - Схема вирізання циліндричних зразків.

Технологію виготовлення вибирали таким чином, щоб уникнути впливу технологічних факторів на механічні властивості матеріалу на робочій ділянці зразка. Точність виготовлення забезпечувалась відповідно до вимог [8, 9]. Діаметр робочої ділянки для всієї партії зразків знаходився в межах $5^{\pm 0,015}$ мм.

Зразки випробовували на автоматизованій сервогидравлічній машині СТМ-100, упродовж експериментів реєстрували зусилля і деформацію з побудовою відповідних діаграм деформування. Зразки попередньо деформували до рівня пластичної деформації $\varepsilon_{pl}=1$ і 3% при температурі 623 К одновісним розтягуванням і розтягуванням з накладанням низькоамплітудної циклічної складової $\Delta\sigma = 110$ і 220 МПа за частоти $f=25$ Гц, тут $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{max}-\Delta\sigma_{min}$; $\Delta\sigma_{max}$ і $\Delta\sigma_{min}$ – найбільше і найменше напруження циклу [10].

Процедура приготування до експериментів зразків, які наводнювали, складала ряд стадій:

1. Хімічне знежирювання зразків за температури 80°C впродовж 30 хв. у водному розчині, склад якого наведений у табл.2. Після цього зразки промивали спочатку в гарячій, а потім у холодній воді.

Таблиця 2 - Склад розчину для обезжирювання зразків

| NaOH, г/л | Na ₂ CO ₃ , г/л | Na ₃ PO ₄ , г/л | Na ₂ SiO ₃ г/л |
|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 30 | 30 | 40 | 2 |

2. Електролітичне наводнювання у розчині сірчаної кислоти (рН0) з добавкою 2 г/л стимулятора наводнювання тіомочевини за густини струму 10 А/дм² та температури 25°C впродовж 2 год.

3. Електрохімічне нікелювання (Ni) у водному розчині, склад якого наведений у табл. 3, впродовж 30 хв. за температури 35°C та густини струму 5 А/дм². Отримане покриття є підкладкою для мідного (Cu) покриття, що слугує бар'єром для виходу з металу абсорбованого водню.

Таблиця 3 - Склад водного розчину для нікелювання

| | | |
|--|--|--------------------------------------|
| NiSO ₄ 7H ₂ O, г/л | NiCl ₂ 6H ₂ O, г/л | H ₃ BO ₃ , г/л |
| 240-300 | 40-60 | 25-40 |

4. Електрохімічне міднення у водному розчині, склад якого наведений у табл. 4, впродовж 30 хв. за температури 25°C та густини струму 5 А/дм².

Таблиця 4 - Склад водного розчину для нанесення мідного покриття

| | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| CuSO ₄ , г/л | H ₂ SO ₄ , г/л |
| 150-250 | 40-120 |

Досліджено дві серії зразків – ненаводнених та наводнених до або після пластичного деформування. Напруження сколювання вихідного (недеформованого) і деформованого матеріалу визначали при температурі 77 К (у рідкому азоті) [9]. Стадійність приготування та випробувань зразків подано на рис. 2.

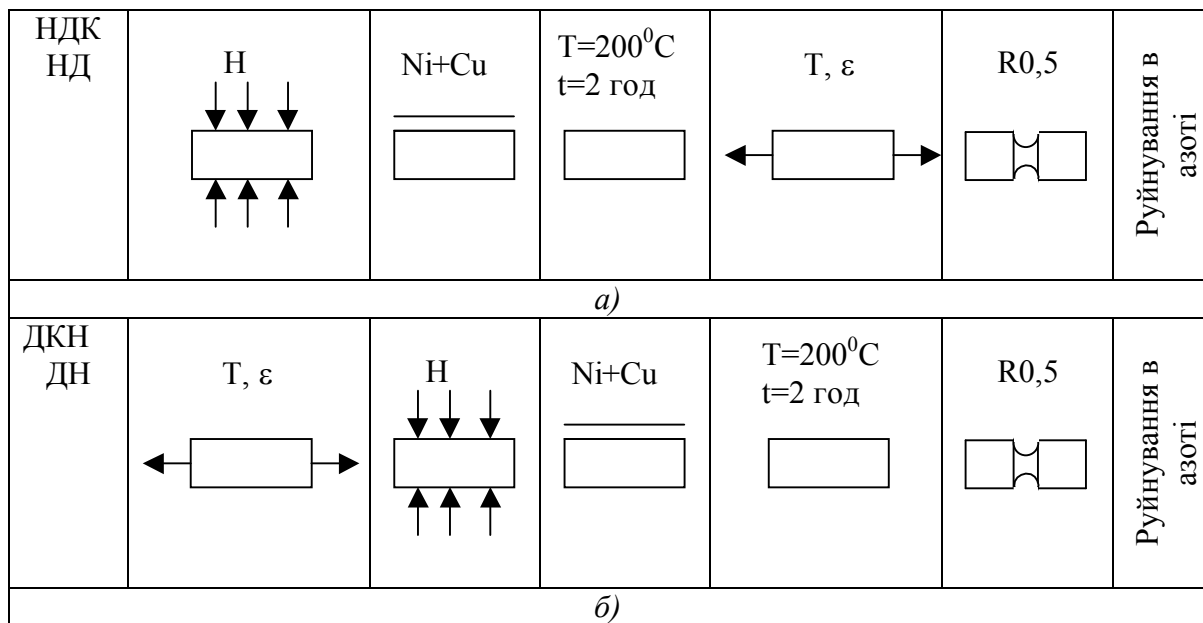


Рисунок 2 - Схеми підготовки і випробування зразків з наводнюванням перед (а) і після (б) ППД: НДК – наводнювання з наступним комбінованим деформуванням; НД – наводнювання з наступним деформуванням без накладання циклічної складової; ДКН – комбіноване деформування з наступним наводнюванням; ДН – деформування без накладання циклічної складової з наступним наводнюванням.

За схемою 2а зразки спочатку наводнювали, потім покривали нікелем і міддю та витримували 2 год. за температури 200 °С для рівномірного розподілу водню по об’єму зразка. Після наводнювання зразки деформували розтягом до відповідної поздовжньої деформації. На деформованих зразках нарізали концентратор радіусом 0,5^{±0,01} мм і негайно поміщали в посудину з рідким азотом для запобігання десорбції з металу водню та випробовували розтягом у середовищі рідкого азоту. Це забезпечувало крихке руйнування і давало можливість інтерпретувати руйнуюче напруження як напруження сколювання $\sigma_{ск}$.

Згідно зі схемою 2б, зразки спочатку деформували, а вже потім наводнювали, покривали нікелем та міддю та витримували при температурі 200°C упродовж 2 год. Після витримки нарізали концентратор радіусом 0,5 мм і випробовували розтягом у рідкому азоті для визначення напруження $\sigma_{ск}$ [8].

Результати дослідження та їх обговорення

Параметри попереднього пластичного деформування, схеми наводнювання та напруження сколювання наведені у табл. 5.

Таблиця 5 - Параметри ППД та напруження сколювання сталі 15Х2МФА

| № з/п | T, К | ε_{pr} , % | $\Delta\sigma$, МПа | Схема нав.(рис.2) | σ_{max} , МПа | $\sigma_{ск}$, МПа |
|---------------------|---------|------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | без ППД | - | - | Н | - | 1980 |
| продовження табл. 5 | | | | | | |
| 2 | 623 | 1 | 110 | НДК | 878 | 2080 |
| 3 | 623 | 3 | 110 | НДК | 876 | 1680 |
| 4 | 623 | 3 | - | НД | 903 | 1790 |
| 5 | 623 | 3 | 110 | ДКН | 893 | 2210 |
| 6 | 623 | 3 | - | ДН | 918 | 2140 |
| 7 | 623 | 3 | - | Д | 934 | 2210 |
| 8 | без ППД | - | - | - | - | 1900 |
| 9 | 623 | 1 | 110 | ДК | 908 | 2050 |
| 10 | 623 | 1 | 220 | ДК | 898 | 2140 |
| 11 | 623 | 3 | 220 | ДК | 918 | 2100 |
| 12 | 623 | 3 | 110 | ДК | 886 | 2000 |

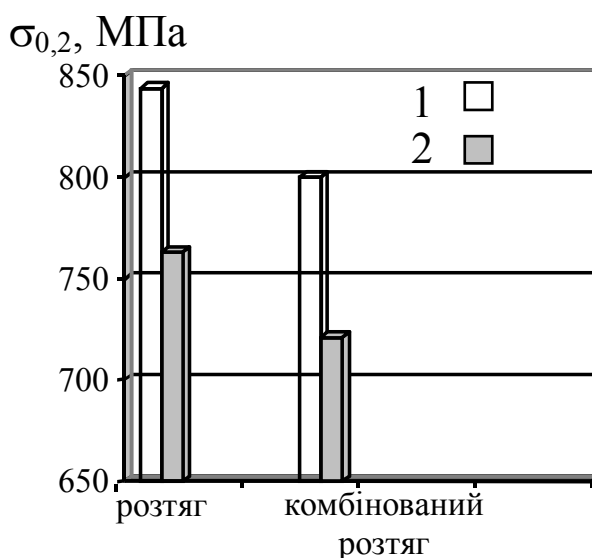


Рисунок 3 - Границя текучості ненаводненої (1) і наводненої (2) сталі за розтягу та комбінованого розтягу ($\Delta\sigma = 110$ МПа).

Величина границі текучості сталі 15Х2МФА (рис.3) більша за випробувань звичайним, ніж комбінованим розтягом як для наводненого, так і для ненаводненого матеріалу. Це означає, що розтяг з накладанням низькоамплітудної циклічної складової зменшує $\sigma_{0,2}$ досліджуваної сталі і за умов наводнювання. В свою чергу, наводнювання на 10 % зменшує границю текучості незалежно від характеру ППД, тобто як за розтягу, так і комбінованого розтягу. Отже, з огляду на зміну границі текучості сталі 15Х2МФА агресивне середовище водень впливає подібно ППД комбінованим навантаженням.

Отримані дані узгоджуються з результатами дослідження впливу газоподібного і внутрішнього (абсорбованого металом під час старіння) водню на характеристики міцності, пластичності сталі 15Х2МФА ($\sigma_{0,2} = 470$ МПа при 25 °С) [11], де встановлено, що водень знижує границю міцності на 13 %, а границю текучості на 15 % у порівнянні з вихідним матеріалом.

Вплив наводнювання і розмаху напружень циклічної складової ППД на напруження сколювання досліджуваної сталі показано на рис. 4.

З рис.4а випливає, що із збільшенням розмаху напружень за комбінованого розтягу і $\varepsilon_{pl} = \text{const}$ напруження сколювання $\sigma_{ск}$ дещо зростає у порівнянні з первісним матеріалом, причому більш істотно при $\varepsilon_{pl} = 1\%$. Зазначимо, що напруження

сколювання при ППД 3,0 % за статичного розтягу більше порівняно з комбінованим розтягом.

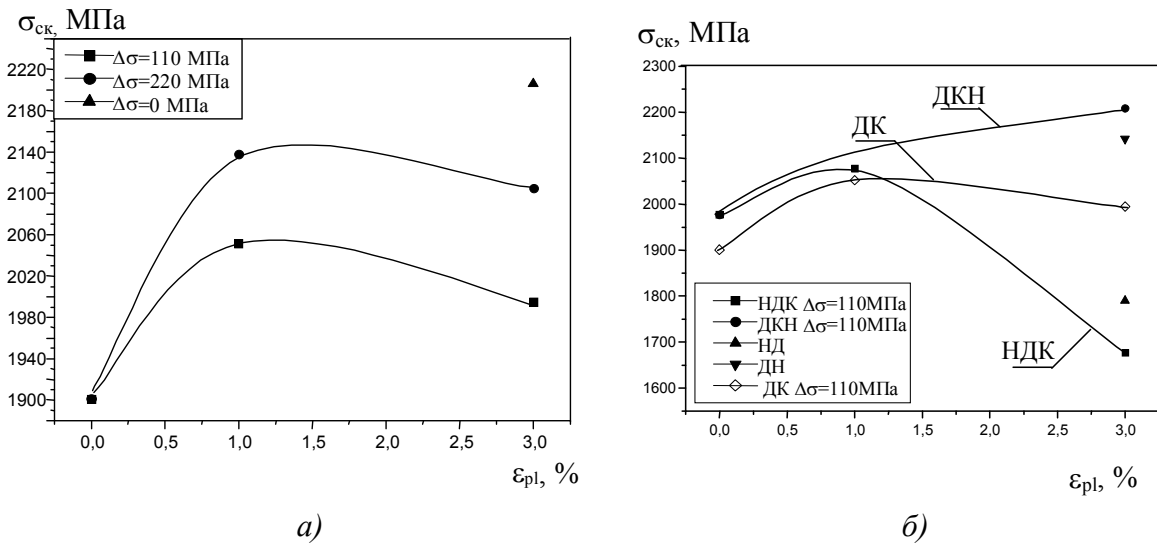


Рисунок 4 - Залежність напруження сколювання ненаводненої (а), і наводненої (б) сталі 15X2MFA від ППД розтягом і комбінованим розтягом при 623 К (позначення згідно з рис. 2).

За наводнювання зразків за схемою 2а (див. рис. 2), коли метал спочатку наводнюється, а потім пластично деформується, напруження сколювання нижче (рис. 4б) як при статичному, так і комбінованому розтягу порівняно з недеформованим матеріалом, якщо рівень ППД становить 3 %, при цьому за такого ППД більше $\sigma_{ск}$ теж властиве статичному розтягу.

Наводнювання за схемою 2б, коли метал спочатку пластично деформується, а потім наводнюється, вже підвищує напруження сколювання при деформації 3%, причому незалежно від характеру ППД, тобто як за статичного розтягу, так і за розтягу з накладанням низькоамплітудної циклічної складової. Зазначимо, що напруження сколювання при комбінованому навантаженні вже вище, ніж при статичному розтязі, а не як у вищенаведеному випадку наводнювання за схемою 2а. Це означає, що послідовність наводнювання і суттєвого ППД (3 %) принципово впливає як на характер впливу ППД на $\sigma_{ск}$, (позитивний чи негативний), так і порівняльний вплив статичного і комбінованого навантаження.

Подібні результати щодо впливу електролітичного водню на напруження сколювання сталей Ст.3, 09Г2С, 08Х4Н2М отримані в праці [12]. Присутність водню в сталі істотно зменшує напруження сколювання з 1300 МПа до 760 МПа для сталі Ст.3, з 1800 МПа до 920 МПа для сталі 08Х4Н2М і змінює рельєф поверхні руйнування зразків; приводячи до появи ділянок крихкого руйнування з численними мікротріщинами.

Неоднозначний вплив ППД на напруження сколювання залежно від послідовності наводнювання і ППД, тобто реалізації схеми 2а чи 2б (див. рис. 2), якщо рівень пластичної деформації значний (3%), можна пояснити особливостями впливу водню на механіку деформування та руйнування конструкційних сталей, в тому числі після ППД. Загально прийнято [5, 13], що воднева крихкість металів може спричинятися як дифузійно рухомим атомарним воднем, який у процесі деформування рухається до локальної області з об'ємонапруженим станом (зону передруйнування), де його концентрація може на порядки перевищувати середню по металу, так і воднем, молізованим у дефектах, через створення у них високого тиску. Оскільки визначення напруження сколювання проводилось шляхом випробувань зразків за температури рідкого азоту, то слід відкинути можливість дифузії водню у процесі деформування розтягом. Тому, в першу чергу, слід брати до уваги вплив водню на процеси

деформування, можливе створення чи релаксацію залишкових напружень та розвитку пошкодженості на стадіях ППД чи наводнювання після ППД (схема 2а чи 2б).

З рис. 4 можна зробити висновок, що за деформації 1 % напруження сколювання, наводненого за схемою 2а і ненаводненого металу, однакові, тобто впливу наводнювання немає, а вищий рівень $\sigma_{ск}$ порівняно з вихідним станом зумовлений ефектом ППД. Збільшення деформації до 3% практично не змінює напруження сколювання за відсутності наводнювання, проте різко його понижуює для наводненого металу. Це означає, що саме ППД попередньо наводненого металу є найбільш небезпечно з огляду його низького опору крихкому руйнуванню, і пояснюється, очевидно, виходячи з класичних уявлень водневої крихкості конструкційних матеріалів, розвитком пошкоджуваності при ППД та підвищеною концентрацією водню в утворених дефектах. Складнішим є пошук пояснення деякого позитивного впливу наводнювання на опір крихкому руйнуванню, якщо воно здійснюється після ППД (схема 2б). В цьому випадку можна припустити, що наводнювання може сприяти релаксації залишкових розтягуючих напружень, створених інтенсивним ППД, і тим самим підвищувати величину напруження сколювання.

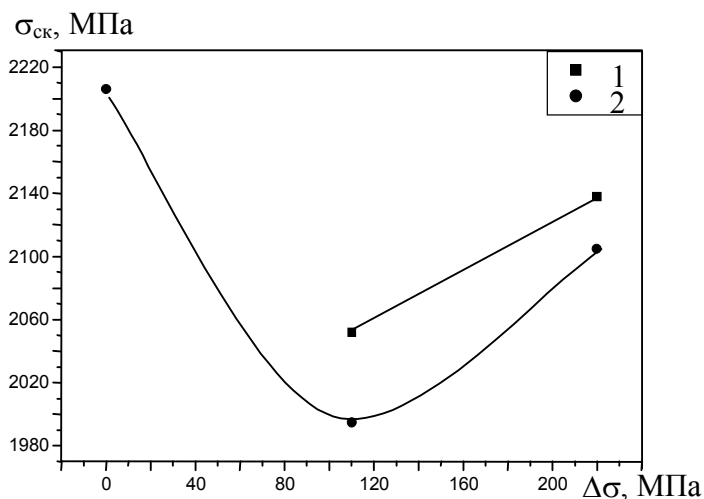


Рисунок 5 - Вплив розмаху напружень циклічної складової ППД на напруження сколювання ($\epsilon_{pl} = 1,0\%$ (1) і $3,0\%$ (2) ненаводненої сталі 15Х2МФА).

Неоднозначний і вплив комбінованого ППД на напруження сколювання в залежності від рівня розмаху напружень циклічної складової $\Delta\sigma$ (рис.5). Так, комбіноване ППД сталі на 3% суттєво зменшує величину $\sigma_{ск}$, якщо $\Delta\sigma=110$ МПа. Проте перехід до $\Delta\sigma=220$ МПа призводить до росту напруження сколювання, хоч його рівень залишається меншим в порівнянні з $\sigma_{ск}$, після ППД статичним розтягом. Отже, можна стверджувати, що накладання циклічної складової напружень у процесі ППД знижує опір крихкому руйнуванню теплостійкої сталі. Якісно цей вплив не залежить від рівня статичної складової ППД, проте з її зменшенням (від 3 % до 1 %) загальний ефект від комбінованого навантаження спадає - напруження сколювання зростає.

Висновки

1. Попереднє пластичне деформування при високих температурах (623 К) комбінованим розтягом, що полягає у накладанні низькоамплітудної циклічної складової на одновісний розтяг, зменшує границю текучості як наводненої, так і ненаводненої теплостійкої сталі 15Х2МФА у стані, що моделює радіаційне окрихчення корпусу реактора типу ВВЕР на середину служби експлуатації.

2. Наводнювання приблизно на 10% зменшує границю текучості сталі 15Х2МФА порівняно з ненаводненим матеріалом як за статичного, так і комбінованого розтягу.
3. Виявлено неоднозначний сумісний вплив попереднього пластичного деформування та наводнювання на напруження сколювання $\sigma_{ск}$ сталі 15Х2МФА залежно від послідовності пластичного на 3% деформування та наводнювання. За деформування наводнених зразків $\sigma_{ск}$ зменшується, а за наводнювання після деформування збільшується у порівнянні з недеформованим матеріалом.
4. Вплив комбінованого попереднього пластичного деформування на напруження сколювання залежить як від величини статичної складової розтягу ϵ_{pl} , так і розмаху напружень циклічної складової $\Delta\sigma$. З підвищенням ϵ_{pl} у діапазоні 1-3% напруження $\sigma_{ск}$ знижується, а вплив $\Delta\sigma$ неоднозначний і максимальний за розмаху 110 МПа.

The influence hydrogen and plastic deformations combined tensile on cleavage stress of heat resistance steel 15Kh2MFA is investigated. The investigation conducted on cylindrical specimens with diameter of a working part of 5 mm. Is detected, that electrolytic hydrogenation of specimens, when the metal at first hydrogenated, and then is plastically deformed, the cleavage stress is lower both at static, and at combined tensile in comparison with a virgin material.

Література

1. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – Санкт-Петербург: Политехника, 1993. – 391 с.
2. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Каплуненко В.Г. Прогнозирование трещиностойкости теплоустойчивых сталей с учетом влияния размеров образцов. Сообщение 1. Результаты экспериментальных исследований // Пробл. прочности. – 1997. - №1.-С.5 – 20.
3. Roman I., Ono Kanji. Model for fracture toughness alteration due to cyclic loading//Int. J. of Fract. – 1982. – №19.- P.67-80.
4. Походня І.К., Котречко В.І. Природа водневої крихкості конструкційних сталей // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2001. - №2. – С. 87-96.
5. Похмурский В.И., Швед М.М., Яремченко Н.Я. Влияние водорода на процессы деформирования и разрушения железа и стали. – К.: Наук. думка, 1977.- 60 с.
6. Крижанівський Є.І., Цирульник О.Т., Петрина Ю.Д. Вплив наводнювання та попереднього пластичного деформування сталі на її тріщиностійкість // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1999. - №5. – С.67-70.
7. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втомі і тріщиночутливість. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
8. РД-50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 95 с.
9. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
10. В.Гуцайлюк, І.Окіпний, О.Ясній. Вплив попереднього комбінованого розтягу на напруження сколювання // Вісник Тернопільського державного технічного університету.- 2004. - Т 9.,- № 4.-С. 19- 25.
11. Студент О.З. Вплив водню на механічні властивості реакторної сталі 15Х2МФА//Машинознавство. – 1999. - №4. – С.23-29.
12. И.К.Походня, В.И.Швачко, В.Н.Упырь, А.В.Шиян, О.Д.Смиян, С.А.Котречко. Влияние водорода на хрупкость конструкционных сталей и их сварных швов//Автоматическая сварка. – 1989. - №5(434). – С. 1-4.
13. В.И.Ткачев, В.И.Холодный, И.Н.Левина. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. – Физико-механический институт им. Г.В. Карпенка. – Львов, 1999. –256 с.

Одержано 02.01.2006 р.