

що випарувався із платинородію, осідає на платиновому електроді. Домішка 0,01 % родію змінює термо-е.р.с. платини при 1200 °C на 150 мкВ.

Вплив властивостей конструкційних матеріалів на стабільність термо-е.р.с. Ізолююча і захисна кераміка зазвичай є основним джерелом забруднень, які можуть змінити хімічний склад і термо-е.р.с. термоелектродів. Взаємодія кераміки і термоелектродів можлива за порівняно високих температур і результат взаємодії виявляється особливо в термopарах, електроди яких представляють собою чисті метали.

В окислювальній атмосфері термopари типу В практично інертні відносно більшості вогнетривких оксидів. Але домішки, що містяться в ізоляційній кераміці, особливо домішки заліза, в глиноземних матеріалах є основною причиною дрейфу термо-е.р.с. термopар типу В. Вважаємо, що сполуки заліза, що містяться в ізоляційній кераміці, дисоціюють, а залізо, що утворюється, взаємодіє з матеріалом термоелектродів. Такий процес може бути реалізований в нейтральних середовищах. В окислювальному середовищі він є менш імовірний і експериментальні дані багатьох авторів підтверджують високу стабільність термо-е.р.с. термopар типу В в окислювальних середовищах.

Однією із можливих причин нестабільності термopар є взаємна дифузія компонентів термоелектродних стопів у робочому з'єднанні. Така дифузія призводить до помітної зміни хімічного складу стопів. І якщо ділянки термоелектродів зміненого хімічного складу знаходяться в зоні градієнта температур, то термо-е.р.с. термopари змінюється. Дифузія може відбуватися не тільки під час експлуатації термopари, але і бути наслідком неправильної технології її виготовлення.

У реальних умовах нестабільність термо-е.р.с. термopар зумовлена багатьма факторами, що діють одночасно. Можна навіть стверджувати, що дрейф показів термopар обумовлений всіма зазначеними вище факторами, а також деякими іншими, до яких можна віднести, наприклад, процеси гомогенізації і зворотні їм процеси утворення кластерів, сегрегації компонентів і домішок у термоелектродних матеріалах за умови високотемпературного нагрівання, релаксації залишкових напружень і ефектів наклепу після деформації під час виготовлення і складання термopар тощо. Однак у більшості випадків дрейф термо-е.р.с. визначається декількома головними причинами, які можуть бути різними для різних типів термopар і умов їх експлуатації, а інші мають другорядне значення.

Висновки. Стабільність і відтворюваність термоелектричних властивостей матеріалів визначається двома основними причинами: хімічним складом і структурним станом матеріалу. Найвищою стабільністю метрологічних характеристик під час вимірювання високих температур газових потоків мають термopари, що виготовлені із шляхетних металів і стопів.

Для підвищення стабільності термо-е.р.с. термopар необхідно зменшити можливість забруднення термоелектродів неорганічними й органічними домішками, що є в захисних чохлах, термоелектродах, кераміці. Це можна досягнути використанням чохла і кераміки з відповідних матеріалів, спеціальних методів очистки поверхні всіх компонентів і їх складання, запобігання попадання вологи на поверхню термopар.

Література

1. Хаяк Г.С. Промышленные изделия из благородных металлов и сплавов / Г.С. Хаяк, А.А. Куранов, М.А. Чебыкин. – М. : Изд-во "Металлургия", 1985. – 264 с.
2. Благородные металлы: справ. изд. / под ред. Е.М. Савицкого. – М. : Изд-во "Металлургия", 1984. – 592 с.
3. Копецкий И.В. Структура и свойства тугоплавких металлов / Иван Васильевич Копецкий. – М. : Изд-во "Металлургия", 1994. – 208 с.
4. Froschauer L. Temperature Measurement with Pt-Rh Thermocouples – Causes of Errors and Failure / L. Froschauer, D. Schmidt // *Interceram.* – 1987. – Vol. 26, № 2.
5. Исследование сплавов для термopар: Труды Гипроцветметобработка. – М. : Изд-во "Металлургия", 1989. – Т. III, вып. 29. – С. 140-150.
6. Фединець В.О. Дослідження тепло- та електроізоляційних матеріалів для засобів вимірювання температури газових потоків / В.О. Фединець // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.1. – С. 126-130.
7. Фединець В.О. Експериментальні випробування термopеретворювачів для вимірювання температури газових потоків на ресурс / В.О. Фединець // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.2. – С. 128-131.
8. Фединець В.О. Термоелектрична нестабільність термopар з тугоплавких металів і сплавів / В.О. Фединець, Л.М. Соляник // Метрологічне забезпечення контактуючих і теплофізичних вимірювань (Термометрія-94) : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. – Х., 1994. – С. 95-96.

Фединец В.А. Анализ и оценка термоэлектрических материалов для средств измерения температуры газовых потоков

Проведен анализ и оценка термоэлектрических материалов из благородных металлов и сплавов как чувствительных элементов средств измерения температуры газовых потоков. Исследована их термоэлектрическая стабильность в зависимости от свойств газового потока и конструкционных материалов, непосредственно контактирующих с ними.

Ключевые слова: газовый поток, термоэлектрические материалы, термopары, термоэлектрическая стабильность, средства измерения температуры.

Fedynets V.O. The analysis and estimation of thermo-electric materials for gas streams temperature measuring facilities

The analysis and estimation of thermo-electric materials from noble metals and alloys as pickoffs of gas streams temperature measuring facilities are conducted. Their thermo-electric stability depending on properties of gas stream and construction materials which directly contact with them is investigated.

Keywords: gas stream, thermo-electric materials, thermocouples, thermo-electric stability, temperature measuring facilities.

УДК 629.017

*Доц. М.Г. Грубель, канд. техн. наук;
викл. М.Б. Сокіл, канд. техн. наук; викл. Р.А. Нанівський –
Академія сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного, м. Львів*

КОЛИВАННЯ ПІДРЕСОРЕНОЇ ЧАСТИНИ КОЛІСНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТА ЇХ ВПЛИВ НА СТІЙКІСТЬ РУХУ ВЗДОВЖ КРИВОЛІНІЙНОЇ ДІЛЯНКИ ШЛЯХУ

Отримано залежність частоти власних прямолінійних коливань підресореної частини колісного транспортного засобу (КТЗ) від амплітуди та параметрів, які описують нелінійно-пружну характеристику відновлюючої сили пружних амортизаторів; проаналізовано їх вплив на критичну швидкість стійкого руху КТЗ вздовж криволінійної ділянки шляху.

Ключові слова : підресорена маса, підвіска, нелінійні коливання, стійкість руху, критична швидкість.

Актуальність та огляд основних результатів. Одним із найважливіших завдань підвіски КТЗ є забезпечення комфортності перевезення пасажирів і вантажів [1-3] та стійкості його руху [4-9] вздовж криволінійної ділянки шляху. Як показано у низці робіт [9-11], належну комфортність КТЗ може забезпечити підвіска, пружні амортизатори котрої характеризуються відновлюючою силою, яка для незначних деформацій пружних елементів приймає малі значення, а для значних – значно зростає із ростом останніх. Водночас, основні теоретичні дослідження, які стосуються динаміки та стійкості руху КТЗ, проводили на базі спрощених, лінійних чи, у кращому випадку, квазілінійних [1, 3, 5] характеристик відновлюючої сили пружних амортизаторів. Такий спрощений підхід зумовлений відсутністю належного математичного апарату аналітичного дослідження нелінійних диференціальних рівнянь, які адекватні динамічному процесу підресореної маси. Отримані результати на базі лінійних моделей не відображають всіх особливостей динамічного процесу, а чисельний ж аналіз нелінійних рівнянь руху не дає відповіді на комплексний вплив всієї низки параметрів підвіски на динаміку та стійкість КТЗ. Виходячи із наведеного, отримання аналітичних залежностей для оцінки динаміки та стійкості руху із урахуванням нелінійно-пружної характеристики амортизаторів є актуальною задачею. Саме її розгляд за умови вертикальних коливань підресореної частини КТЗ є предметом розгляду цієї роботи.

Постановка задачі та методика розв'язування. Для дослідження впливу нелінійно-пружних характеристик амортизаторів підвіски на вертикальні коливання підресореної частини КТЗ та стійкість його руху вздовж криволінійної ділянки шляху за фізичну модель приймемо систему двох тіл: не підресорена – 1 та підресорена – 2 частини (рис. 1).

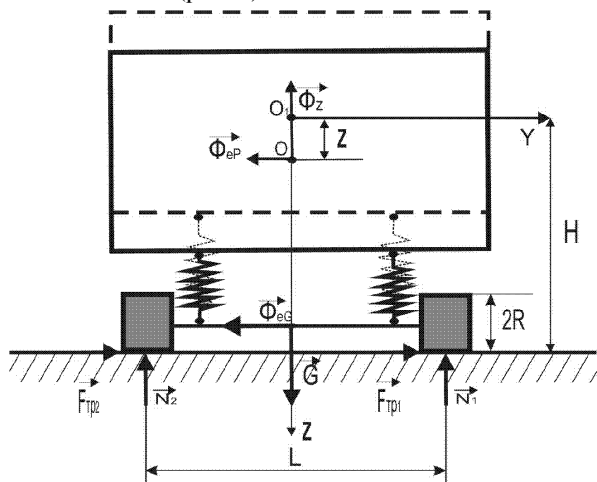


Рис. 1. Фізична модель вертикальних коливань підресореної частини КТЗ

Взаємодія між вказаними частинами відбувається завдяки невагомим пружним елементам (амортизаторам) -3. Вважається, що відновлююча сила ос-

таних описується залежністю: $F_{пр} = f(\Delta)$, де $f(\Delta)$ – відома непарна функція, Δ – деформація пружного елемента.

У зв'язку із цим, що характеристики пружних елементів однакові та розглядаються тільки вертикальні коливання підресореної частини, центр ваги підресореної частини повинен знаходитись на однаковій віддалі від точок кріплення пружних елементів і підресореної частини [11]. Будемо вважати: а) КТЗ рухається із сталою за величиною швидкістю V вздовж криволінійної ділянки шляху, радіус кривизни котрого є незмінним й рівний ρ ; б) ваги підресореної та не підресореної частин відповідно рівні P та G ; в) масами та пружними властивостями коліс можна знехтувати; г) площина коливань підресореної частини (відносного руху) співпадає із площиною ZOY і вона перпендикулярна до вектора переносної швидкості руху центру мас підресореної частини (вектора \vec{V}). У такому разі рівняння кінестатики вказаної системи набувають вигляду:

$$\begin{aligned} -(N_1 + N_2) + P + G - \Phi_r &= 0, \\ F_{1mp} + F_{2mp} - \Phi_{eP} - \Phi_{eG} &= 0, \\ -N_2L + (G + P)\frac{L}{2} + \Phi_{eP}(H + z) + \Phi_{eG}R - \Phi_r\frac{L}{2} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де: \vec{N}_1, \vec{N}_2 та $\vec{F}_{1mp}, \vec{F}_{2mp}$ – зовнішні сили системи (нормальні реакції дороги та сили поперечного тертя); $\vec{\Phi}_{eP}$ та $\vec{\Phi}_{eG}$ – рівнодійні сили інерції переносного руху підресореної та не підресореної частин (зумовлені криволінійністю дороги); $\vec{\Phi}_{rP}$ – рівнодійна сила інерції підресореної частини відносного руху, z – відносна (відносно положення статичної рівноваги) центру ваги підресореної частини.

Примітка. У роботі нехтується сталим кутом відхилення від вертикалі підресореної частини зумовленого рухом КТЗ вздовж криволінійної ділянки шляху незмінної кривини.

Виходячи із наведених вище обмежень щодо руху підресореної частини КТЗ, вказані вище сили інерції визначаються залежностями: $\Phi_{eP} = \frac{P V^2}{g \rho}$; $\Phi_{eG} = \frac{G V^2}{g \rho}$; $\Phi_{rP} = \frac{P}{g} \ddot{z}$, а напрямки їх вказані на рис. 1, до того ж, $F_{1mp} = kN_1$, $F_{2mp} = kN_2$ (k – коефіцієнт тертя). Обмежуючись максимальними значеннями вказаних величин, отримуємо:

$$\begin{aligned} -(N_1 + N_2) + P + G \mp \frac{P}{g} a_z \omega_z^2(a_z) &= 0, \\ F_{1mp} + F_{2mp} - \frac{P V^2}{g \rho} - \frac{G V^2}{g \rho} &= 0, \\ -N_2L + (G + P)\frac{L}{2} + \frac{P V^2}{g \rho}(H \pm a_z) + \frac{G V^2}{g \rho} R \mp \frac{P}{g} a_z \omega_z^2(a_z)\frac{L}{2} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де: a_z та $\omega_z^2(a_z)$ – відповідно амплітуда та частота власних вертикальних коливань підресореної частини, а верхній (нижній) знак у відповідних сумах відпо-

відає максимальній (мінімальній) віддалі центру мас підресореної частини від не підресореної частини. Із умови стійкості руху ($N_1 \geq 0$) знаходимо максимально допустиме ($V_{кр.}$) значення швидкості руху КТЗ вздовж криволінійної ділянки шляху як мінімальне значення критичних швидкостей руху за умови, що підресорена частина займає крайнє верхнє положення:

$$V_{кр.в.} = \sqrt{\frac{P + G - \frac{P}{g} a_z \omega_z^2(a_z)}{P(H + a_z) + GR}} \rho g \frac{L}{2} \quad (3)$$

та крайнє нижнє положення:

$$V_{кр.н.} = \sqrt{\frac{P + G + \frac{P}{g} a_z \omega_z^2(a_z)}{P(H - a_z) + GR}} \rho g \frac{L}{2} \quad (4)$$

Таким чином, $V_{кр.} = \min(V_{кр.в.}, V_{кр.н.})$.

Як окремий випадок із залежностей (3) та (4) при $a_z = 0$, отримується значення критичної швидкості руху без урахування відносних коливань підресореної частини: $\bar{V}_{кр.} = \sqrt{\frac{P + G}{PH + GR}} \rho g \frac{L}{2}$. Проте, як показують дослідження [7], вказане критичне значення швидкості є значно завищеним. Звідки і впливає необхідність визначення такого значення вказаної величини, яка б враховувала коливань підресореної частини, точніше кажучи їх амплітуду та частоту. Вказані параметри визначаються у загальному випадку природою збурення коливань підресореної частини, нелінійно-пружною характеристикою відновлюючої сили амортизаторів та початковими умовами. Визначення вказаних характеристик коливань підресореної частини є предметом подальших досліджень роботи.

Методика визначення основних параметрів нелінійних коливань підресореної частини. Відомо [11], динамічний процес твердого тіла однозначно визначається діючими на нього силами та початковими параметрами руху. Як було наголошено вище, у роботі розглядаємо лише випадок прямолінійних коливань підресореної частини КТЗ. Для їх описання використаємо диференціальне рівняння відносного її руху:

$$\frac{P}{g} \ddot{w} = \bar{P} + 2\bar{F}_{пр.} + \bar{\Phi}_e, \quad (5)$$

де \bar{w} – вектор відносного пришвидшення центру мас підресореної частини. Вказане рівняння, із урахуванням загального вигляду залежності для нелінійної відновлюючої сили амортизаторів трансформується до вигляду:

$$\frac{P}{g} \ddot{z} + 2f(z) = P. \quad (6)$$

У роботі пружними характеристиками та масами коліс нехтується, у протилежному випадку задача значно ускладнюється, а тому динамічний процес підресореної частини вважається зумовленим дією нерівності дороги. Її вплив на динаміку враховується початковими умовами, тобто розглядаються випадок

лише одинокі нерівності, яка спричиняє ідентичні збурення руху обох коліс. Таке "миттєве" збуренням із достатнім ступенем точності моделюється початковими умовами: $z|_{t=0} = z_0, \dot{z}|_{t=0} = \dot{z}_0$.

Зауважимо, якщо із фізичних міркувань відновлюючою силою коліс не можна нехтувати, то у цьому випадку під $f(\Delta)$ потрібно розуміти силу, що еквівалентна пружним амортизаторам та пружним колесам.

Для інтегрування рівняння (6) формально ввівши у нього нову змінну $\frac{d\psi}{dt} = \omega(a_z)t$, відповідне йому однорідне трансформується до вигляду:

$$\frac{d^2z}{d\psi^2} \omega^2(a_z) + \frac{2g}{P} f(z) = 0. \quad (7)$$

Наступною заміною змінних $\frac{dz}{d\psi} = u(z)$ приводимо (7) до диференціального рівняння першого порядку:

$$u(z) \frac{du}{dz} \omega^2(a_z) + \frac{2g}{P} f(z) = 0. \quad (8)$$

Його розв'язок має вигляд:

$$u(z) = \frac{dz}{d\psi} = \left(u_0^2 + \frac{4g}{\omega_z^2(a_z)P} \int_z^{z_0} f(\xi) d\xi \right)^{1/2}, \quad (9)$$

де u_0 узгоджується із початковими умовами та використаною заміною змінних.

Наступним інтегруванням знаходимо неявну залежність для розв'язку нелінійного однорідного рівняння:

$$\psi - \psi_0 = \int_{z_0}^z \left(u_0^2 - \frac{4g}{\omega_z^2(a_z)P} \int_{z_0}^z f(\xi) d\xi \right)^{-1/2} dz. \quad (10)$$

В останньому співвідношенні ψ_0 – стала, яка відповідає початковій умові $z(\psi_0) = z_0$.

Зокрема, якщо нелінійна характеристика пружних елементів описується залежністю $f(\Delta) = c\Delta^{\nu+1}$ (саме такою характеристикою вдається описати відновлюючі сили пружних амортизаторів багатьох типів КТЗ [10-13]), то із (10) випливає, що відносний рух підресореної частини описується за допомогою періодичних Ateb- функцій [12] у вигляді:

$$z(t) = a_z c a (\nu + 1, 1, \omega_z(a_z)t + \psi_0), \quad (11)$$

де $\omega_z(a_z) = \sqrt{\frac{cg(\nu+2)}{P}} a_z^{\nu/2}$. Як і для лінійного випадку ($\nu = 0$), амплітуда a_z та початкова фаза коливань ψ_0 визначаються через початкові умови залежностями

$$\left(\frac{z_0}{a_z} \right)^{\nu+2} + \left(\frac{\dot{z}_0(\nu+2)}{2a_z \omega(a_z)} \right)^2 = 1,$$

$$cta(v+1,1,\psi_0) = \frac{2\omega(a)}{v+2}. \quad (12)$$

Зокрема, якщо $\dot{z}_0 = 0$, то $a_z = z_0$, якщо ж $z_0 = 0$, то $a_z^{1+v/2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P(v+2)}{cg}}$.

Одночасно отримані залежності дають змогу отримати розрахункові критичні значення швидкості криволінійного руху

$$V_{кр.в.} = \sqrt{\frac{P+G-c(v+2)a^{v+1}}{P(H+a_z)+GR}} \rho g \frac{L}{2}, \quad (13)$$

$$V_{кр.н.} = \sqrt{\frac{P+G+c(v+2)a^{v+1}}{P(H-a_z)+GR}} \rho g \frac{L}{2}. \quad (14)$$

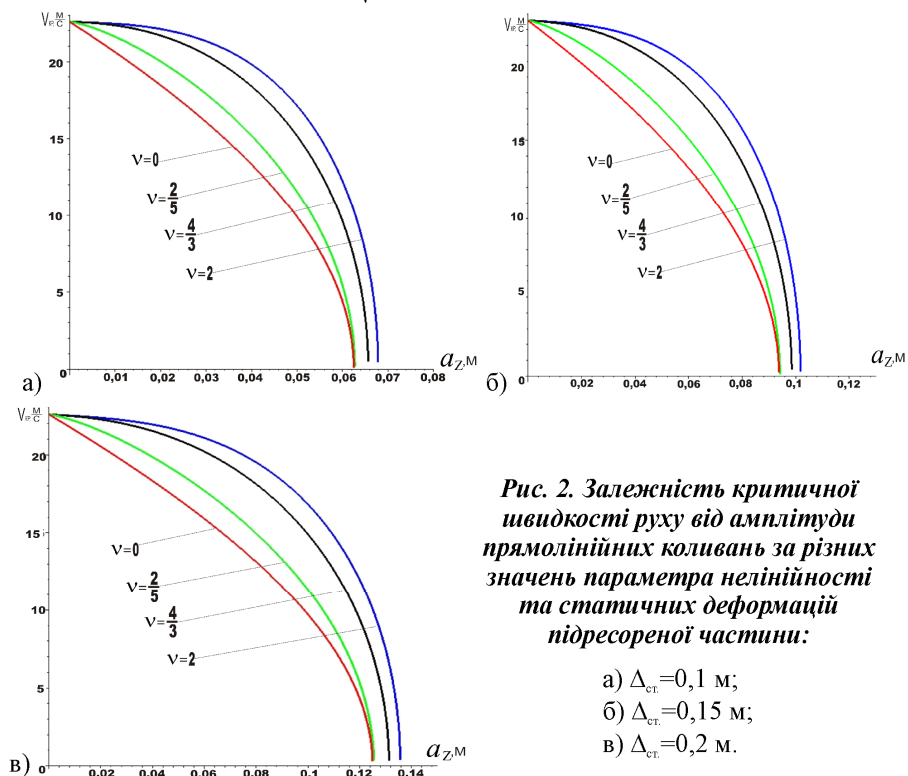


Рис. 2. Залежність критичної швидкості руху від амплітуди прямолінійних коливань за різних значень параметра нелінійності та статичних деформацій підресореної частини:

- а) $\Delta_{ст} = 0, 1 \text{ м}$;
- б) $\Delta_{ст} = 0, 15 \text{ м}$;
- в) $\Delta_{ст} = 0, 2 \text{ м}$.

Чисельний аналіз отриманих залежностей показує, що для реальних значень параметрів КРЗ критичне значення швидкості, отримане на базі залежності (14), є завищеним. Таким чином, розрахункове значення критичної швидкості КТЗ на криволінійній ділянці шляху відповідає залежності:

$$V_{кр.} = \sqrt{\frac{P+G-c(v+2)a_z^{v+1}}{P(H+a_z)+GR}} \rho g \frac{L}{2}.$$

На рис. 2 представлено залежності критичної швидкості руху КТЗ від амплітуди коливань за таких значень параметрів: $P = 20000H$, $G = 5000H$, $H = 1,1\text{м}$, $R = 0,5\text{м}$, $\rho = 50\text{м}$, $g = 10\text{м}/\text{с}^2$ та різних значень статичної деформації пружних амортизаторів.

Висновки. Отримані у роботі аналітичні залежності для визначення частоти прямолінійних коливань підресореної частини та критичної швидкості руху КТЗ вздовж криволінійної ділянки шляху можуть слугувати базою для модернізації підвісок. Одночасно вони показують: а) для більших значень амплітуди нелінійних коливань критичне значення стійкого руху є меншим; б) для більш жорстких підвісок (меншого значення статичної деформації пружних амортизаторів) критичне значення стійкого руху більшою мірою залежить від амплітуди коливань; в) для більших значень параметра v критичне значення швидкості є більшим.

Література

1. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля / Р.В. Ротенберг. – М. : Изд-во "Машиностроение", 1972. – 392 с.
2. Раймпель Й. Шаси автомобиля: Элементы подвески : пер. с нем. А.Л. Карнухина; под ред. Г.Г. Гридасова. – М. : Изд-во "Машиностроение", 1988. – 288 с.
3. Подригало М.А. Динамика автомобиля / М.А. Подригало, В.П. Волков, А.А. Бобшко, В.А. Павленко, В.Л. Файст, Д.М. Клец, В.В. Редько / под ред. М.А. Подригало. – Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2008. – 424 с.
4. Подригало М.А. Устойчивость колесных машин против заноса в процессе торможения и пути ее повышения / М.А. Подригало, В.П. Волков, А.А. Бобшко, В.А. Павленко, М.В. Байцур, А.И. Назаров, В.О. Алексеев / под ред. М.А. Подригало. – Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2006. – 337 с.
5. Подригало М.А. Оцінка динамічної стійкості автомобіля / М.А. Подригало, М.І. Корбко, Д.М. Клец // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – Харків, 2008. – Вип. 58. – С. 134-137.
6. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М. : Изд-во "Машиностроение", 1971. – 416 с.
7. Божкова Л.В. Влияние поперечных вынужденных колебаний на опрокидывание автомобиля при объезде препятствия / Л.В. Божкова, В.Г. Нябов, Г.И. Норицина // Транспортное дело России. – Казань, 2009. – № 03. – С. 65-73.
8. Кравець І.А. Вплив конструкції підвіски на стійкість руху колісних машин високої прохідності / І.А. Кравець, Б.О. Мельник // Междисциплинарные исследования в науке и образовании. – Волгоград, 2011. – № 1sm. [Электронный ресурс]. – Доступный с [http://www.ES.Rae.ru/msno/153-500\(23/11/2913\)](http://www.ES.Rae.ru/msno/153-500(23/11/2913)).
9. Кузьо І.В. Вплив параметрів підвіски на нелінійні коливання транспортних засобів / І.В. Кузьо, Б.І. Сокіл, В.М. Палюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2007. – № 588. – С. 49-52.
10. Сокіл Б.І. Власні вертикальні коливання корпусу автомобіля з урахуванням нелінійних характеристик пружної підвіски / Б.І. Сокіл, Р.А. Нанівський, М.Г. Грубель // Автомобільний транспорт : наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 5 (235). – С. 15-18.
11. Кильчевский Н.А. Курс теоретической механики / Н.А. Кильчевский. – М. : Изд-во "Наука". – 1977. – Т. II. – 544 с.
12. Сенік П.М. Обернення неповної Beta-функції / П.М. Сенік // Украинский математический журнал. – К., 1969. – Вип. 21, № 3. – С. 325-333.

Грубель М.Г., Сокіл М.Б., Нанівський Р.А. Колебания подрессоренной части колесного транспортного средства и их влияние на устойчивость движения вдоль криволинейного участка пути

Получена зависимость частоты собственных прямолинейных колебаний подрессоренной части колесного транспортного средства (КТС) от амплитуды и параметров, которые описывают нелинейно-упругую характеристику восстановительной силы упругих амортизаторов; проанализировано их влияние на критическую скорость устойчивого движения КТС вдоль криволинейного участка пути.

Ключевые слова: подрессоренная масса, подвеска, нелинейные колебания, устойчивость движения, критическая скорость.

Grubel M.H., Sokil M.B., Nanivskyi R.A. Oscillations of the sprung part of wheeled vehicles and its influence on road holding along the curvilinear stretch of a track

The dependence of frequency of own rectilinear oscillations of the sprung part of wheeled vehicles on the amplitude and parameters, which describe a nonlinear elastic characteristic of restoring force of elastic shock absorbers is obtained; their influence on the critical velocity of stable motion of wheeled vehicles along the curvilinear stretch of a track is analyzed.

Keywords: sprung mass, suspension, nonlinear oscillations, road holding, critical velocity.

УДК 620.x194+197і

Докторант О.Е. Нарівський¹, канд. техн. наук – Запорізький НТУ

КОРОЗІЙНА ПОВЕДІНКА СПЛАВУ 06ХН28МДТ У МОДЕЛЬНІЙ ОБОРОТНІЙ ВОДІ ПІД ОСАДОМ

Досліджено корозійну поведінку сплаву 06ХН28МДТ у модельній оборотній воді з рН4 і концентрацією хлоридів 600 мг/л. Встановлено закономірності та механізми корозійного розчинення Cr, Ni та Fe зі сплаву. Показано, що корозійні втрати сплаву відбуваються, в основному, в околі великих включень та границями зерен аустеніту. Доведено, що корозійні втрати сплаву більше залежать від його структурної гетерогенності, ніж від зміни хімічного складу в межах стандарту. Окрім цього, встановлено, що великі включення нітридів і окисульфідів титану, катодно захищаючи сплав 06ХН28МДТ, знижують корозійні втрати Cr, Ni та Fe з пітінгів та границями зерен аустеніту.

Ключові слова: модельна оборотна вода, корозійні втрати, хлоридовмісне середовище, пітінгова корозія, корозійностійкий сплав.

Вступ. Корозійностійкий сплав 06ХН28МДТ застосовують у виробництві емнісної та теплообмінної апаратури, яку використовують у технологічних процесах із сірчаною, хромовою і фосфорною кислотами [1]. Сплав 06ХН28МДТ у цих корозійних середовищах має достатню стійкість. Однак з боку оборотної води, яку застосовують у роботі теплообмінної апаратури, цей конструкційний матеріал піддається пітінговій та щільній корозії.

Найчастіше причиною пітінгування елементів теплообмінної апаратури з боку оборотної води є хлорид-іони та температура [2-4]. Відомо [5, 6], що під осадом із оборотної води на поверхні теплообмінників, внаслідок процесу гідратації іонів металу, знижується рН оборотної води, зростає концентрація хлорид-іонів і локально підвищується температура. Ці чинники є причиною пітінгування матеріалу теплообмінників.

Раніше [2, 4] досліджували пітінгостійкість сплаву в модельних оборотних водах з рН4...8 і концентрацією хлоридів 300...600 мг/л. Пітінгостійкість оцінювали за критичною температурою пітінгування сплаву і $\Delta\phi$ – критерієм.

¹ Наук. керівник: проф. С.Б. Беліков, д-р техн. наук

Впровадження результатів дослідження у виробництво дозволило уникнути пітінгування обладнання, але дещо обмежило його технологічні можливості. З метою усунення цього недоліку раніше [7, 8] досліджували кінетику корозійного розчинення сплаву 06ХН28МДТ у хлоридовмісних розчинах з рН4...8 і концентрацією хлоридів 180 мг/л. Однак, як зазначено вище, на поверхні теплообмінників з боку оборотної води випадає осад, де накопичується вміст хлоридів до 600 мг/л і знижується рН води до 4. Тому визначення корозійної поведінки сплаву у цих умовах є актуальною проблемою.

Мета роботи – дослідити закономірності та встановлювали механізми корозійного розчинення Cr, Ni, та Fe зі сплаву 06ХН28МДТ у модельній оборотній воді з рН4 і концентрацією хлоридів 600 мг/л.

Матеріали та методика досліджень. Зразки виготовляли з п'яти промислових плавків сплаву 06ХН28МДТ. Хімічний склад і складові структури сплаву визначали раніше [2-4]. Зразки досліджуваного сплаву витримували у хлоридовмісному розчині з рН4 і концентрацією хлоридів 600 мг/л за температури 70 °С впродовж 240 год. Хлоридовмісний розчин із зазначеними вище параметрами отримували додаючи у водяний розчин хлористого магнію MgCl₂ соляну кислоту HCl або гідроксид натрію NaOH. Вміст заліза у розчинах після термостатування зразків визначали методом, що базується на взаємодії іонів двохвалентного заліза з 1,10-фенантроліном із утворенням червоного комплексу з максимумом світлопоглинання 510nm. Відновлення заліза (III) до заліза (II) проводили застосовуючи гідроксиламін. Вміст хрому у розчинах після термостатування зразків визначали методом, який базується на реакції Cr⁺⁶ з дифенілкарбазидом і екстракції утвореної сполуки із трихлороцетовою кислотою ізоміловим спиртом, з наступним визначенням оптичної густини цієї сполуки на КФК-3 при $\lambda=540\text{nm}$. Вміст нікелю у розчинах визначили методом, який базується на взаємодії іонів нікелю із диметилглюоксином у слабоаміачному середовищі за наявності бромиду, із утворенням комплексної сполуки від жовтого до червоного кольору залежно від концентрації нікелю. Фотометричним методом визначали оптичну густину розчину при $\lambda=440\text{nm}$.

Коефіцієнти селективного розчинення хрому і нікелю визначали за формулою

$$Z_{(Cr;Ni)} = \frac{\Delta m_{(Cr;Ni)} \cdot m_{(Fe)}}{\Delta m_{(Fe)} \cdot m_{(Cr;Ni)}}; \tag{1}$$

де: $Z_{(Cr; Ni)}$ – коефіцієнт селективного розчинення хрому або нікелю; $\Delta m_{(Cr; Ni)}$ – вміст хрому або нікелю у розчинах після термостатування у них зразків, мг; $\Delta m_{(Fe)}$ – вміст заліза у розчинах після термостатування у них зразків, мг; $m_{(Cr; Ni)}$ – вміст хрому або нікелю у сталі, мас.%; $m_{(Fe)}$ – вміст заліза у сталі, мас.%.

Прямолінійні регресивні залежності між корозійними втратами заліза ΔFe , хрому ΔCr , нікелю ΔNi після витримки зразків у досліджених хлоридовмісних розчинах та вмістом у сплаві хімічних елементів (N_i) і складовими структурами (V_n – об'єм нітридів титану об.%, L_n – середня відстань між нітридами титану; мкм, $V_{ок}$ – об'єм окисульфідів титану, об/%; $L_{ок}$ – середня відстань між