

DEVICES BASED ON SHAPE MEMORY ALLOYS FOR INCREASING RELIABILITY OF BOLTED ELECTRICAL CONTACT CONNECTIONS

V. Romaniuk

National University of Food Technologies

Key words:

*Shape memory alloy
Reliability
Electrical contact
Contact resistance
Finite element method
Ansys*

Article history:

Received 09.01.2023
Received in revised form
27.01.2023
Accepted 14.02.2023

Corresponding author:

V. Romaniuk

E-mail:

v.t.romaniuk@gmail.com

ABSTRACT

Increasing reliability of bolted electrical contact connections is an important problem in power engineering. Such connections are very common and their damage can lead to serious consequences. One of the ways to increase reliability of bolted electrical connections is the use of special devices based on shape memory alloys (SMAs). This article contains an analysis of four devices that destroy films (oxides, sulfides etc.) which form on a contact surface of bolted electrical connections during operation. Destruction of such films slows down process of a contact connection degradation and, accordingly, extends its service life, thereby increasing reliability of a contact connection. The following devices were analyzed: a conical washer made of SMA, "Detachable connection of conductors with a contact crown nut", "Terminal lug" with shape memory effect (SME) element. These devices have SME elements which during activation increase a contact pressure in an electrical connection and, accordingly, destroy films on a contact surface. Another "Terminal lug" with SME element was also analyzed. This device has SME element which during activation displaces one contact relative to another. This motion cleans a contact surface from films without affecting a contact pressure. Analysis of these devices, in particular using the finite element method, which was implemented using Ansys 2020 R2 Academic software, showed the following disadvantages and features of the above-mentioned devices: the need to manufacture specially designed contact connection elements, the locality of a pressure increase on a contact surface, and the need to disassemble contact connections when installing SME elements. Based on the conducted analysis, a new design of a contact connection was proposed. This new design does not have indicated disadvantages and its principle of operation is based on a combined destruction of films on a contact surface by increasing a contact pressure and by the relative displacement of the contacts.

ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗБІРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ

В. Т. Романюк

Національний університет харчових технологій

Підвищення надійності розбірних електричних контактних з'єднань є важливою проблемою в електроенергетиці. Такі з'єднання дуже поширені і їх пошкодження може призводити до важких наслідків. Одним із способів підвищення надійності розбірних електричних з'єднань є використання спеціальних пристроїв на основі сплавів з ефектом пам'яті форми (ЕПФ). У статті проаналізовано чотири пристрої, які руйнують сторонні плівки, що утворюються на контактній поверхні розбірних електричних з'єднань у процесі роботи. Руйнування сторонніх плівок уповільнює процес деградації контактного з'єднання і, відповідно, подовжує термін його експлуатації. У такий спосіб підвищується надійність контактного з'єднання.

Аналізувались такі пристрої: конічна шайба, виготовлена зі сплаву з ЕПФ, роз'ємне з'єднання провідників з контактною коронковою гайкою, апаратний затискач з елементом з ЕПФ, в якому при спрацюванні елементи з ЕПФ збільшують контактний тиск в електричному з'єднанні і руйнують сторонні плівки на контактній поверхні, та затискач апаратний з елементом з ЕПФ, в якому при спрацюванні елемент з ЕПФ зміщує один контакт відносно іншого, при цьому відбувається зачищення контактної поверхні від сторонніх плівок без впливу на контактний тиск.

У результаті аналізу вищезазначених пристроїв, зокрема з використанням методу скінченних елементів, що був реалізований завдяки використанню програмного засобу Ansys 2020 R2 Academic, були виявлені такі недоліки та особливості роботи вищезгаданих пристроїв: необхідність виготовлення елементів контактного з'єднання особливої конструкції, розбирання контактного з'єднання при встановленні елементів з ЕПФ і локальність збільшення тиску на контактній поверхні. На основі проведеного аналізу була запропонована конструкція контактного з'єднання, що не має вказаних недоліків і принцип дії якої заснований на комбінованому руйнуванні сторонніх плівок на контактній поверхні шляхом збільшення контактного тиску та відносного зсуву контактів.

Ключові слова: сплав з ефектом пам'яті форми, надійність, електричний контакт, контактний опір, метод скінченних елементів, Ansys.

Постановка проблеми. Електричні мережі мають велику кількість електричних контактних з'єднань (зокрема розбірних). Їх пошкодження може призводити до важких наслідків, тому актуальним є завдання підвищення надійності цих з'єднань. Сплави з ефектом пам'яті форми (ЕПФ) мають унікальні властивості, що дають змогу використовувати їх для вирішення цього завдання. ЕПФ, який роз-

глядається, передбачає, що матеріал, який ним володіє, після деформації повертається до своєї оригінальної форми внаслідок нагрівання.

Метали (сплави) мають кристалічну структуру, тобто атоми в об'ємі металу розташовані в певному порядку. Сплави з ЕПФ можуть знаходитись у двох різних фазах — аустеніт (високотемпературна фаза — кубічний тип ґратки) та мартенсит (низькотемпературна фаза — гексагональний або моноклінний тип ґратки).

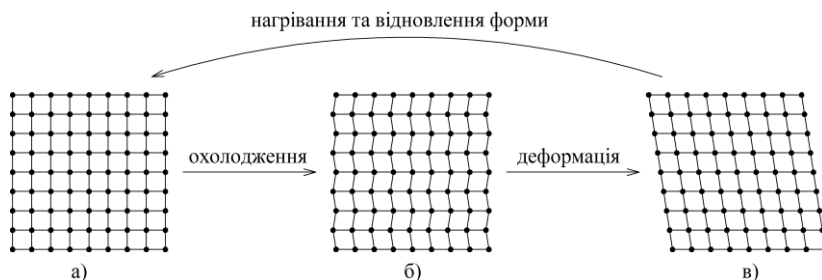


Рис. 1. Спрощене зображення кристалічних ґраток у сплаві з ЕПФ:

а) аустеніт; б) двійниковий мартенсит; в) деформований мартенсит

На рис. 1, б видно, що елементи мартенситної фази можуть бути орієнтовані ліворуч або праворуч. При деформації матеріалу в мартенситній фазі її елементи змінюють свою орієнтацію. На рис. 1, в показаний варіант структури матеріалу після деформації, де всі елементи структури орієнтовані ліворуч. Варто зауважити, що при деформації в такому механізмі не відбувається порушення оригінальних міжатомних зв'язків. Якщо такий деформований зразок нагріти вище температури A_f (рис. 2), мартенсит повністю перетворюється на аустеніт. При цьому атоми потрапляють на свої попередні місця (оскільки оригінальні зв'язки між атомами не були порушені). На макроскопічному рівні спостерігається повертання форми матеріалу до тієї, яку матеріал мав до деформації (рис. 1).

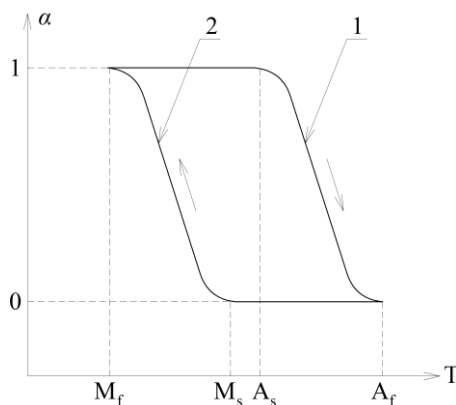


Рис. 2. Діаграма фазових перетворень у сплаві з ЕПФ:

α — частка мартенситу в об'ємі матеріалу; 1 — обернене мартенситне перетворення, при нагріванні; 2 — пряме мартенситне перетворення, при охолодженні; A_s , A_f — температури початку та кінця оберненого мартенситного перетворення; M_s , M_f — температури початку та кінця прямого мартенситного перетворення

Після охолодження відбувається ще одне фазове перетворення — аустеніт перетворюється у двійниковий мартенсит. При цьому на макроскопічному рівні нічого не спостерігається, оскільки двійниковий мартенсит займає такий самий об'єм, як і аустеніт. Зразок стає готовим до нового циклу деформація — відновлення форми (Arun, Chakravarthy, ArockiaKumar, & Santhosh, 2018).

У процесі роботи розбірні контактні з'єднання деградують. Це виявляється через збільшення контактного опору. До однієї з основних причин, через які збільшується контактний опір електричного з'єднання, можна віднести появу сторонніх плівок на контактній поверхні, перш за все через процеси окиснення (Slade, 2014). Одним із можливих способів підвищення надійності розбірних електричних з'єднань шляхом використання сплавів з ЕПФ є руйнування сторонніх плівок, що виникають на контактній поверхні в процесі роботи. Існує декілька варіантів реалізації цього способу, для чого розроблені відповідні пристрої. В цій статті виконується аналіз та порівняння чотирьох таких пристроїв, а також розробка нової конструкції пристрою аналогічного призначення. Аналіз наявних і розробка нових пристроїв сприяє їх поширенню, удосконаленню і впровадженню, що, своєю чергою, спрямоване на підвищення надійності систем електрозабезпечення в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із способів нормалізації електричного контакту при нагріванні розбірний електричного з'єднання є збільшення контактного тиску. Збільшення контактного тиску зменшує контактний опір, температуру контакту та збільшує ресурс контактного з'єднання. Збільшення контактного тиску руйнує сторонні плівки на контактній поверхні.

У літературі поширеним пристроєм для аналізу є конічна шайба, виготовлена зі сплаву з ЕПФ, яка при нагріванні створює додатковий контактний тиск.

Розглянемо дослідження шведських науковців на цю тему, де вивчається можливість використання конічної шайби з ЕПФ для підвищення надійності з'єднання та як єдине джерело зусилля в з'єднанні (рис. 3). В результаті виявилось, що обидва варіанти є допустимими (Oberg, & Nilsson, 1993).

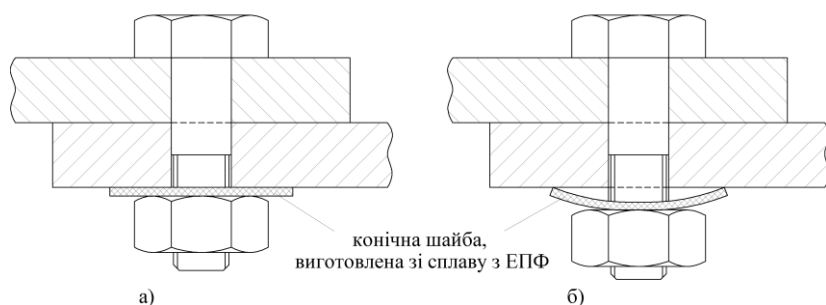


Рис. 3. Принцип використання конічної шайби, виготовленої зі сплаву з ЕПФ в електричному болтовому з'єднанні

а) з'єднання за нормальної температури; б) з'єднання за підвищеної температури через нагрівання струмом перевантаження або короткого замикання

У процесі дослідження використовувався сплав CuAlNi. Конічна шайба стискається при кімнатній температурі. Вона відновлює форму при нагріванні до температури (температура A_f) вище 75 °C (рис. 3, б). При відновленні своєї попе-

редньої форми шайба збільшує контактний тиск з'єднання. Контактний опір в обох випадках після спрацювання елемента з ЕПФ був меншим, ніж у контрольному зразку без шайби з ЕПФ (Oberg, & Nilsson, 1993).

Більш ретельне дослідження аналогічної за конструкцією шайби з ЕПФ провели вчені з Канади. Досліджувався сплав CuAlMn. Тестування проводилося значно довше та з циклічною подачею струму (на відміну від шведських вчених). Результати показали беззаперечний позитивний вплив шайби з ЕПФ на якість з'єднання. Порівняно з іншими засобами, які використовувались для утворення задовільного контактного з'єднання (шайбою Гровера та конічною шайбою), шайба з ЕПФ виявилась найбільш ефективною. Автори зазначають, що навіть при низькому початковому контактному тиску (при неправильній установці болтового з'єднання), шайба з ЕПФ при нагріванні нормалізує контакт. Це, на думку авторів, має велику практичну цінність, оскільки польові дослідження показали, що дуже часто з'єднання виходять з ладу саме через неправильну їх установку (Braunovic, & Labrecque, 1995; Braunovic, & Labrecque, 1996).

Проводилось також дослідження шайб зі сплаву CuAlNiMnTi, які показали схожі результати (Labrecque, Braunovic, Terriault, Trochu, & Schetky, 1996).

Українські автори пропонують використовувати схожу конічну шайбу, яка виготовлена з матеріалу з ЕПФ (сплаву CuAlMn). Її рекомендується включати в болтове з'єднання, яке затягнуте до номінального зусилля. Таким чином шайба з ЕПФ буде відновлювати свою форму та створювати тиск лише у разі появи деформації і зниження контактного тиску в з'єднанні (Козирський, Ткачук, & Слушний, 2018).

Проведений авторами розрахунок показав високу ефективність зазначених елементів з ЕПФ. При використанні їх в електричних болтових контактних з'єднаннях збільшуються граничні терміни проведення ремонтних робіт і терміни служби контактів у 3—4 рази (Козирський, Ткачук, & Слушний, 2018; Козирський, Ткачук, Волошин, & Слушний, 2019).

Мета дослідження: проаналізувати пристрої, виготовлені на основі сплавів з ЕПФ для підвищення надійності розбірних електричних з'єднань шляхом руйнування сторонніх плівок на контактній поверхні при спрацюванні елементів з ЕПФ та розробити дизайн нового пристрою, ґрунтуючись на виявлених при аналізі особливостях і недоліках наявних пристроїв.

Матеріали і методи. Компаративний аналіз, метод скінченних елементів (реалізований за допомогою програмного засобу Ansys 2020 R2 Academic).

Викладення основних результатів дослідження. Як видно з аналізу літератури, конічні шайби, виготовлені зі сплавів з ЕПФ для використання в електричних розбірних з'єднаннях, досить добре досліджені в Україні та за кордоном (Oberg, & Nilsson, 1993; Braunovic, & Labrecque, 1995; Braunovic, & Labrecque, 1996; Labrecque, Braunovic, Terriault, Trochu, & Schetky, 1996; Козирський, Ткачук, & Слушний, 2018; Козирський, Ткачук, Волошин, & Слушний, 2019; Trochu, & Terriault, 1998; Braunovic, Myshkin, & Konchits, 2006; Slade, 2014; Chen, Fang, & Tian, 2014; Li, Liu, Xie, Liu, & Long, 2017; Li та ін., 2019). Тут варто зазначити, що в багатьох проведених дослідженнях пропонується виготовляти конічні шайби зі сплавів з ЕПФ на основі міді. Цей вибір може бути обґрунтованим економічними та виробничими міркуваннями. Сплави NiTi, попри те, що є дорожчими та більш

важкооброблюваними, вирізняються кращими характеристиками (Alaneme, & Okotete, 2016). Застосування конічних шайб зі сплавів NiTi у болтових з'єднаннях залишає місце для подальших досліджень. Кілька років тому китайські вчені почали проводити дослідження в цьому напрямку (Li, Liu, Xie, Liu, & Long, 2017; Li та ін., 2019).

Існують також альтернативні розробки, які потребують більш детального вивчення. Розглянемо їх.

Збільшувати контактний тиск можна принципово іншим способом (патент України № 17429 «Роз'ємне з'єднання провідників з контактною коронковою гайкою») (рис. 4).

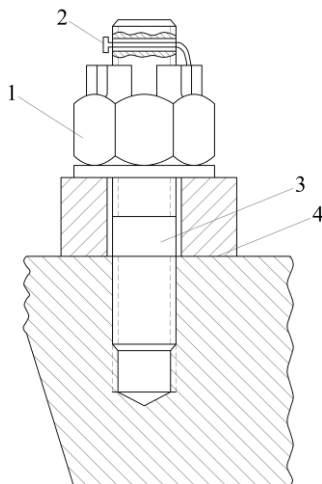


Рис. 4. Загальний вигляд шпилькового з'єднання:

1 — коронкова гайка; 2 — силовий елемент з ЕПФ; 3 — шпилька; 4 — контактна поверхня

У цьому разі силовий елемент з ЕПФ 2 при підвищенні температури створюватиме крутний момент і закручуватиме гайку. Це, своєю чергою, збільшить контактний тиск, зруйнує сторонні плівки на контактній поверхні та зменшить контактний опір.

Конічна шайба та силовий елемент у контактній коронковій гайці впливають на роботу болта (або як на рис. 4 — шпильки). З проаналізованих у літературному огляді досліджень зрозуміло, що ступінь виявлення ЕПФ (і, відповідно, створюваного нею зусилля) в конічній шайбі залежить від прикладеного до неї зусилля. Також при зменшенні температури до нормальної конічна шайба більше не буде створювати додаткового зусилля і, відповідно, контактний тиск зменшиться. Коронкова гайка після спрацювання елемента з ЕПФ закручується, при цьому контактний тиск дещо збільшиться та залишатиметься підвищеним при спаданні температури до нормальної.

Існує варіант пристрою, в якому елемент з ЕПФ відділений від болтового з'єднання та створює тиск на контакт незалежно від створеного болтом зусилля (патент України № 8909 «Апаратний затискач») (рис. 5).

Термочутливий елемент 1 має фігурну форму. В нормальних умовах він випрямляється та вставляється в паз 2. При підвищенні температури, термочутли-

вий елемент нагрівається до температури зворотного мартенситного перетворення, відновлює свою фігурну форму, різко збільшуючи контактний тиск. Це руйнує сторонні плівки на поверхні контактів, зменшує контактний опір, температура контакту зменшується і він повертається до нормального режиму роботи.

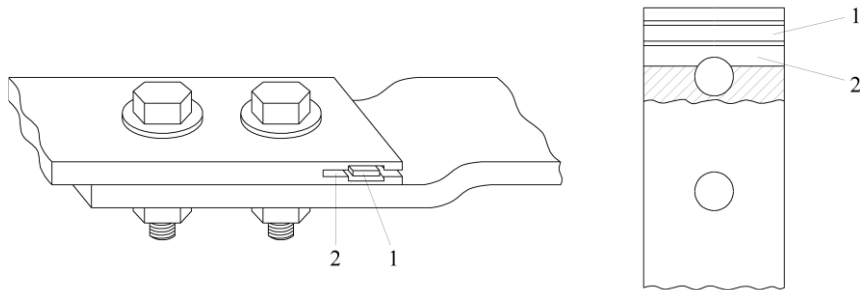


Рис. 5. Апаратний затискач з термочутливим елементом:

1 — термочутливий елемент; 2 — паз

Оскільки вищезгадані пристрої створюють силовий вплив на елементи контактного з'єднання, для кращого розуміння їх роботи можна провести аналіз з використанням методу скінченних елементів. Як геометрію для аналізу обрано останній представлений пристрій — апаратний затискач з елементом з ЕПФ. Використаний тип аналізу — Static Structural. Розміри контактів — $100 \times 40 \times 10$ мм. Болти — M14. Матеріал контактів — мідь (модуль Юнга: 110 ГПа, коефіцієнт Пуассона: 0,35), матеріал болтів і гайок — сталь марки 20 (модуль Юнга: 200 ГПа, коефіцієнт Пуассона: 0,28). Налаштування сітки: метод генерації сітки для контактів — Hex Dominant з розміром елементів 5 мм; метод генерації сітки для болтів і гайок — Multi Zone з розміром елементів 3 мм. Ці параметри обрані з урахуванням того, щоб зробити сітку якомога детальнішою, не виходячи за обмеження, накладені академічною версією програми Ansys. Контакти (Connections) між болтами та гайками обрано нерухожими (bonded), всі інші контакти між окремими частинами моделі обрано без тертя (frictionless). Модель навантажена так: попереднє навантаження болтів (bolt pretension): 18860 Н; сила, з якою елемент з ЕПФ при спрацюванні тисне на верхню та нижню поверхню паза, в якому він знаходиться припустимо 3000 Н. Попереднє навантаження болтів обрано як половина від критичного їх навантаження $F_{\text{крит.}}$, яке розраховано таким чином. Якщо радіус болта $r = 7$ мм, а площа перерізу $S = \pi \cdot r^2 = 153,94 \text{ мм}^2$, то, враховуючи границю плинності 245 МПа (для сталі 20), $F_{\text{крит.}} = 245 \cdot 153,94 = 37,72 \text{ кН}$. Половина від цього значення становить 18,86 кН. Також для стабільності модель закріплена з двох сторін за допомогою нерухомих опор (fixed support), що встановлені на місцях, в яких контакти продовжуються, але не беруться до уваги при моделюванні.

Налаштування моделі та її геометрія зображені на рис. 6.

Перевірялись три випадки:

1. Без впливу елемента з ЕПФ та з нормальним попереднім навантаженням болтів.

2. Без впливу елемента з ЕПФ, але зі збільшеним попереднім навантаженням болтів на величину дії елемента з ЕПФ (по 6000 Н на кожен болт).

3. З урахуванням впливу елемента з ЕПФ та з нормальним попереднім навантаженням болтів.

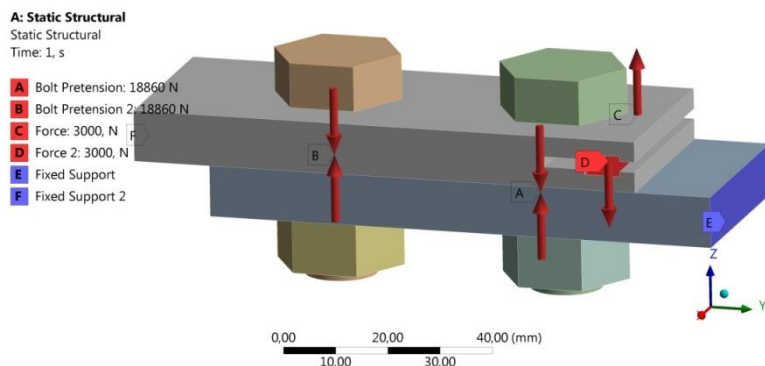


Рис. 6. Геометрія та налаштування моделі

Перший випадок є контрольним, другий можна розглядати як наслідок використання конічних шайб з матеріалу з ЕПФ або контактної коронкової гайки, третій випадок симулює роботу апаратного затискача з елементом з ЕПФ.

Як результат оцінювалось нормальне напруження в матеріалі за напрямком осі Z. Результати знімались по лінії, що проведена біля контактної поверхні верхнього контакту вздовж осі Y, як показано на рис. 7.

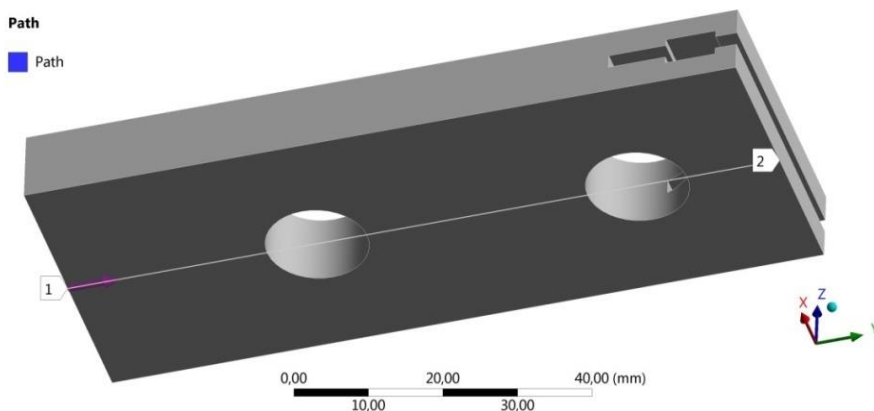


Рис. 7. Лінія, вздовж якої знімались покази напружень на верхньому контакті

Результати моделювання показані на графіку (рис. 8).

Приблизно з точки $x = 28$ мм до $x = 42$ мм та $x = 72$ мм до $x = 86$ мм спостерігається значне збільшення напружень, цим областям відповідають значення напружень у болтах. Стрибки від негативних значень до позитивних обумовлені різними напрямками сил у болтах і матеріалі контакту.

Напруження в правому болті мають такий вигляд через специфічну геометрію паза для елемента з ЕПФ. Як бачимо, напруження в ньому вирівнюються при спрацюванні елемента з ЕПФ.

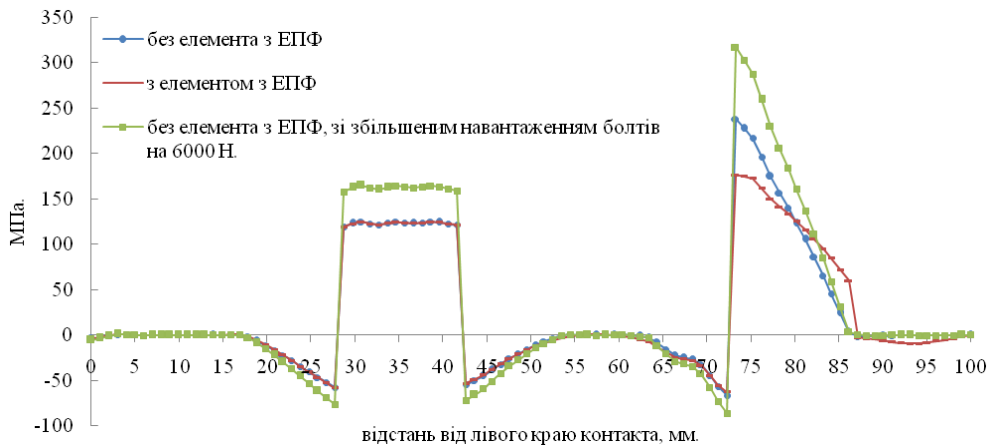


Рис. 8. Результат моделювання

Збільшення навантаження болтів призводить до збільшення напружень у матеріалі контакту, але, як видно з графіка на рис. 8, напруження збільшуються лише досить близько до болта. При віддаленні від болта приблизно на 10 мм додаткове збільшення їх навантаження мало впливає на напруження в матеріалі контакту. При спрацюванні елемента з ЕПФ (червона лінія на графіку) відбувається збільшення напружень в тих областях контакту, де раніше їх не було або практично не було (приблизно з точки $x = 89$ мм до $x = 98$ мм), також бачимо збільшення напружень у точках від $x = 63$ мм до $x = 65$ мм і навіть близько до точки $x = 53$ (на графіку не дуже помітно).

Аналіз з використанням методу скінченних елементів свідчить про те, що в усіх розглянутих пристроях тиск на контактній поверхні при спрацюванні елементів з ЕПФ створюється досить локально. Тобто в усіх випадках контактний тиск при спрацюванні елементів з ЕПФ збільшується в зоні дії цих елементів. Щоб розширити зону силового впливу елементів з ЕПФ можна збільшувати зусилля, яке генерується цими елементами (наприклад, через підбір сплаву та розмірів і форми елементів з ЕПФ), але при цьому потрібно зважати на можливості матеріалів контактів витримувати додаткове зусилля без пластичної деформації. Для розглянутої моделі збільшувати зусилля вже недоречно, оскільки напруження в матеріалі контакту перебувають практично на межі міцності для міді, а для алюмінію обмеження будуть ще жорсткішими. Отже, можна зробити висновок, що варто збільшити не зусилля, а кількість точок прикладання зусилля, що знаходиться в допустимих для матеріалу контактів межах.

Також варто відмітити інший підхід (патент України № 10817 «Затискач апаратний») (рис. 9). Цей пристрій призначений руйнувати оксидні плівки на поверхні контактів без впливу на контактний тиск. Він також працює незалежно від зусилля, створюваного болтом.

За таких умов при нагріванні контактного з'єднання елемент з ЕПФ відновлюватиме свою форму та чинитиме тиск на контакт. Контакт при цьому переміститься на незначну відстань — 0,1—0,3 мм. Це спричинить руйнування плівок оксидів на контактних поверхнях і зменшить контактний опір.

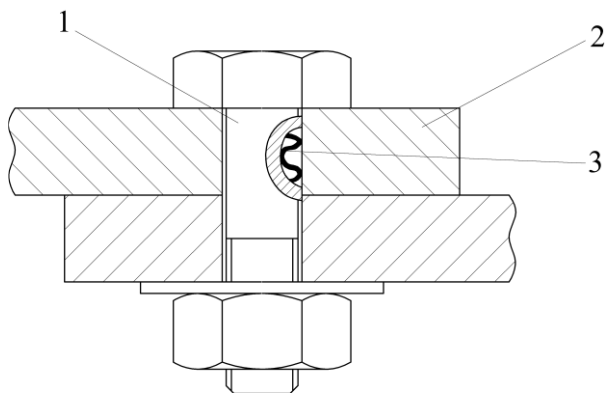


Рис. 9. Контактний болт з термочутливим пристроєм:
1 — болт; 2 — контакт; 3 — термочутливий елемент з ЕПФ

Такий принцип руйнування сторонніх плівок на контактній поверхні, а також інтерпретація результатів моделювання та деякі інші недоліки вищезгаданих пристроїв (необхідність у виготовленні елементів контактного з'єднання особливої конструкції, необхідність у розбиранні електричного з'єднання для встановлення елемента з ЕПФ) враховані в наступному дизайні розбірного електричного з'єднання з елементом з ЕПФ.

Загальний вигляд запропонованого автором цієї статті з'єднання показаний на рис. 10, де 1 — термочутливий елемент з ЕПФ; 2 — верхній контакт; 3 — нижній контакт; 4 — болти, які з'єднують контакти 2 і 3.

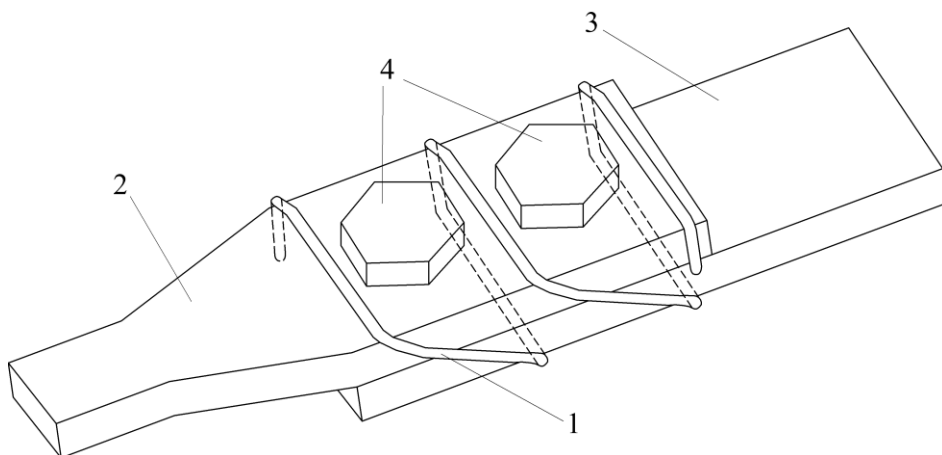


Рис. 10. Загальний вигляд запропонованого пристрою

Термочутливий елемент 1 виготовляється зі сплаву з ЕПФ та має форму пружини, що огортає контактне з'єднання. При виготовленні та наданні термочутливому елементу 1 вихідної форми, він виготовляється під габарити менші на кілька відсотків, ніж габарити з'єднання. Відповідно, при встановленні термочутливого елемента 1 на контактне з'єднання, він попередньо деформується (розширюється). Температура повного спрацювання термочутливого елемента 1 (температура кінця оберненого мартенситного перетворення) обирається з урахуванням максимально допустимої температури контактного з'єднання.

Пристрій працює таким чином: у процесі роботи на контактній поверхні між контактами 2 та 3 відбувається ріст сторонніх плівок, при цьому збільшується контактний опір і, відповідно, температура контактного з'єднання (контактів 2, 3 та з'єднувальних елементів — болтів 4 і гайок 5). Оскільки термочутливий елемент 1 огортає контакти 2 та 3, при їх нагріванні він також нагріватиметься. При підвищенні температури до температури зворотного мартенситного перетворення термочутливого елемента 1, він «згадуватиме» свою вихідну форму, стискуватиметься та чинитиме тиск на елементи контактного з'єднання (передусім на контакти 2 та 3). Відповідно, контактний тиск збільшиться, що призведе до зменшення контактного опору, зокрема внаслідок руйнування сторонніх плівок на контактній поверхні. Крім того, оскільки зусилля, що створюється термочутливим елементом 1 спрямовується не лише перпендикулярно до контактної поверхні, цей ефект додатково сприятиме руйнуванню сторонніх плівок на контактній поверхні внаслідок відносного зсуву елементів контактного з'єднання (зсуву контактів 2 та 3 один відносно одного). Після спрацювання термочутливого елемента 1, контактний опір і, відповідно, температура контактного з'єднання (температура всіх його елементів 2—5) зменшиться і він перейде в нормальний режим роботи. Термочутливий елемент 1 внаслідок охолодження перейде в низькотемпературний стан, внутрішні напруження в матеріалі зменшаться і він буде готовий до спрацювання при подальшому виникненні сторонніх плівок на контактній поверхні та, відповідно, зростанні контактного опору і температури з'єднання. Запропонована конструкція не вимагає розбирання контактного з'єднання для встановлення термочутливого елемента, що спрощує процес монтажу.

Висновки

Конічна шайба зі сплаву з ЕПФ, роз'ємне з'єднання провідників з контактною коронковою гайкою та апаратний затискач з елементом з ЕПФ генерують зусилля, яке збільшує контактний тиск і спрямоване на руйнування сторонніх плівок на контактній поверхні. Аналіз з використанням методу скінченних елементів показав, що ці пристрої створюють додатковий контактний тиск локально. Також проаналізований пристрій «Затискач апаратний» з елементом з ЕПФ, в якому елемент з ЕПФ при спрацюванні зміщує один контакт в контактному з'єднанні відносно іншого, при цьому відбувається зачищення контактних поверхонь та видалення сторонніх плівок без збільшення контактного тиску. Всі вказані пристрої потребують розбирання наявних електричних з'єднань для встановлення елементів з ЕПФ. Також усі пристрої, окрім конічної шайби зі сплаву з ЕПФ, потребують виготовлення елементів контактного з'єднання особливої конструкції.

На основі проведеного аналізу запропонована конструкція розбірного електричного з'єднання з елементом з ЕПФ, яка характеризується тим, що її принцип дії полягає в комбінованому руйнуванні сторонніх плівок на контактній поверхні шляхом збільшення контактного тиску та відносного зсуву елементів контактного з'єднання; підвищення контактного тиску в разі спрацювання елемента з ЕПФ відбувається більш рівномірно (через те, що елемент з ЕПФ стискає контактне з'єднання по всій його довжині); запропонований пристрій не потребує елементів контактного з'єднання особливої конструкції; процес монтажу елемента з ЕПФ є таким, який не вимагає розбирання наявних електричних з'єднань.

Література

Козирський, В. В., Ткачук, І. П., Волошин, С. М., Слушний, І. І. (2019). Обґрунтування термінів ремонтних робіт та прогнозування строків служби контактів розбірного типу за умов неповноти вихідної інформації. *Техніка та енергетика*, 10(4), 13—17. doi: 10.31548/machenergy 2019.04.013.

Козирський, В. В., Ткачук, І. П., Слушний, І. І. (2018). Динамічне управління контактним тиском у розбірних електричних контактах з використанням сплавів з ефектом пам'яті форми. *Енергетика і автоматика*, 2, 5—26. doi: 10.31548/energiya2018.02.005.

Alaneme, K. K., Okotete, E. A. (2016). Reconciling viability and cost-effective shape memory alloy options — A review of copper and iron based shape memory metallic systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3), 1582—1592. doi: 10.1016/j.jestch. 2016.05.010.

Arun, D. I., Chakravarthy, P., Arockia Kumar, R., & Santhosh, B. (2018), *Shape Memory Materials*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Braunovic, M., & Labrecque, C. (1995). Shape-memory alloy mechanical contact devices, Electrical Contacts — 1995. Proceedings of the Forty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (pp. 21—32). Montreal, Quebec, Canada: IEEE. doi: 10.1109/HOLM.1995.482858.

Braunovic, M., & Labrecque, C. (1996). Shape-memory alloy mechanical contact devices. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 19(3), 295—303. doi: 10.1109/95.536830.

Braunovic, M., Myshkin, N. K., & Konchits, V. V. (2006). *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*. CRC Press.

Chen, T., Fang, X., & Tian, H. (2014). Application Research of Memory Alloy Washer on Power Equipment Safety and Energy Saving. *Advanced Materials Research*, 842, 719—724. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.842.719.

Labrecque, C., Braunovic, M., Terriault, P., Trochu, F., & Schetky, M. (1996). Experimental and theoretical evaluation of the behavior of a shape memory alloy Belleville washer under different operating conditions, Electrical Contacts — 1996. Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts (pp. 195—204). Chicago, IL, USA: IEEE. doi: 10.1109/HOLM.1996.557197.

Li, W., Liu, L., Xie, Y., Liu, Y., & Long, Y. (2017). Study on the self-suppression heating effect of NiTi shape memory alloy dish gasket, 2017 EPTC Power Transmission and Transformation Technology Conference (pp. 1—6). Chongqing. doi: 10.1049/cp.2017.0542.

Li, W., Liu, L., Yang, Y., Xie, Y., Chen, J., Sun, L., & Long, Y. (2019). Application of NiTi memory alloy dish gasket in power grid, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 295 032081. doi: 10.1088/1755-1315/295/3/032081.

Oberg, A., & Nilsson, S. (1993). Shape memory alloys for power connector applications, Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (pp. 225—228). Pittsburgh, PA, USA: IEEE. doi: 10.1109/HOLM.1993.489680.

Slade, P. G. (Ed.). (2014). *Electrical Contacts: Principles and Applications*, Second Edition (2nd ed.). CRC Press.

Trochu, F., Terriault, P. (1998). Nonlinear modelling of hysteretic material laws by dual kriging and application. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 151(3—4), 545—558. doi: 10.1016/S0045-7825(97)00165-5.