



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 59790

(13) A

(51) 7 C22F1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДВидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ЗІ СПЛАВІВ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ

1

2

(21) 20021210196

(22) 17 12 2002

(24) 15 09 2003

(46) 15 09 2003, Бюл. № 9, 2003 р.

(72) Соловійов Станіслав Миколайович, Ніколаєв
Олександр Львович, Поліщук Віталій Анатолійо-
вич, Пилипчак Віталій Іванович(73) УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МОРСЬКИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ АДМІРАЛА МА-
КАРОВА(57) 1 Спосіб виготовлення виробів зі сплавів з
ефектом пам'яті форми на основі нікеліду титану,
що включає загартування, відпалювання при
проміжних температурах і термосилове циклуван-
ня, який відрізняється тим, що термосилове цик-
лування здійснюють шляхом пригніченої дефор-
мації через температурні інтервали прямого і
зворотного мартенситного перетворення2 Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що тер-
мосилове циклування елементів з ефектом пам'яті
форми здійснюють при величині деформації наве-дення, що досягає граничної деформації фазової
пластичності3 Спосіб за пп. 1 чи 2, який відрізняється тим, що
відпалювання проводиться при температурі, яка
допускає виділення надлишкових компонентів, що
стають концентраторами напружень4 Спосіб за пп. 1, 2 чи 3, який відрізняється тим,
що сплав термообробляють при температурах,
близьких до нижньої границі інтервалу
відпалювання5 Спосіб за пп. 1, 2 чи 3, який відрізняється тим,
що сплав термообробляють при температурах,
близьких до верхньої границі інтервалу
відпалювання6 Спосіб за пп. 1 чи 3, який відрізняється тим, що
при виготовленні циліндричних пружинних силових
елементів навивання здійснюють з мінімально
можливим індексом $s = D/d$ і кутом підймання вит-
ка, при якому деформація зсуву матеріалу при
стисканні пружини до торкання витків досягає де-
формації фазової пластичності

Винахід відноситься до області термомеханіч-
ної обробки сплавів з ЕПФ, зокрема до виготов-
лення виробів на основі нікеліду титану і може
бути використаний в системах регулювання й ав-
томатики для виготовлення деформаційно-
силових температурочутливих елементів регулю-
ючих, силових, захисних і вимірювальних пристро-
їв

Відомо про спосіб виготовлення виробів зі
сплаву системи нікеліду титану, який полягає в
тому, що сплав гартують від температур бета-
області і піддають пластичній деформації при тем-
пературі вище кінця зворотного мартенситного
перетворення (Пат. Швейцарії №555892, М. Кл.
C22F1/00, 1974р.)

Існує також спосіб зміни температурної області
перетворення сплавів з ЕПФ на основі нікеліду
титану, який полягає в тому, що після загартуван-
ня виріб піддають відпалюванню при температурі
вище температурної області перетворення і для
одержання більш високої температури перетво-
рення температури відпалювання підвищують і

навають (Пат. США №4283233, М. Кл. C22F1/10,
11 08 1981р.)

Недоліками даних способів є неможливість
забезпечення значних величин деформації і зу-
силья формовідновлення, а також довговічності
роботи виготовлених елементів за рахунок наяв-
ності крупнозернистої структури і відсутності оріє-
нтування мартенситної фази

Прототипом запропонованого винаходу є
спосіб виготовлення виробів зі сплавів на основі
нікеліду титану, який дозволяє покращити ЕПФ за
допомогою термомеханічної обробки, за патентом
США №4304613, М. Кл. C22F1/10, 08 12 1981р.,
відповідно до якого після загартування, для
підвищення параметрів ЕПФ подрібнюють струк-
туру сплаву шляхом холодного деформування й
відпалювання при проміжних температурах
500-600°C, а для одержання заданого
орієнтування структури проводять термосилове
циклування за наступною методикою: Охолоджен-
ня до температури меншої температури перетво-
рення, прикладання навантаження, що забезпечує

(13) A

(11) 59790

(19) UA

деформацію 5–8%, нагрівання під навантаженням до температури вище температури перетворення, охолодження під навантаженням до температури нижче температури перетворення, багаторазове повторення всього циклу

Недоліками даного способу є обмежені технологічні можливості й експлуатаційні властивості, зокрема низька циклічна довговічність оброблюваного матеріалу і ступінь оборотності деформації через недостатнє фазове і деформаційне наклепування, неможливість реалізації ефекту оборотної пам'яті форми через недостатнє текстуровання мартенситної фази з кристалографічним напрямком у бік прикладеного навантаження, відсутність технологічних методів забезпечення бажаних характеристик оброблюваних матеріалів (наприклад, збільшення-зменшення збуджуваної сили і відновлюваної деформації, чи збільшення різниці сил при низькій і високій температурах)

Задача винаходу полягає у створенні способу виготовлення виробів зі сплавів з ЕПФ, який дозволяє поліпшити експлуатаційні властивості і розширити технологічні можливості оброблюваних елементів з ЕПФ на основі системи нікель-титан

Задача вирішується наступним чином. При виготовленні виробів зі сплавів з ЕПФ на основі нікеліду титану способом, який включає загартування, відпалювання при проміжних температурах і термосилове циклування, останнє здійснюють способом пригніченої деформації через температурні інтервали прямого і зворотного мартенситних перетворень, при цьому величина деформації наведення може досягати границі фазової пластичності. А відпалювання проводять при температурі, яка допускає утворення виділень надлишкових фазних компонентів, що стають концентраторами напружень, і температурах близьких до верхньої або нижньої границі інтервалу відпалювання. При виготовленні ж пружинних силових елементів навивка здійснюється з мінімально можливим індексом $c=D/d$ і кутом підймання витка, при якому деформація зсуву матеріалу при стисканні пружини до торкання витків досягає деформації фазової пластичності

Термосилове циклування способом пригніченої деформації через температурні інтервали прямого та зворотного мартенситного перетворення дозволяє поліпшити циклічну довговічність за рахунок переходу матеріалу в мартенситний стан при різкому зменшенні зовнішнього напруження. Оскільки передчасне руйнування нікеліду титану відбувається через нагромадження ушкоджень головним чином у процесі деформування (чи в процесі утворення під напруженням) мартенситу, причому по мірі зростання числа циклів спостерігається поступовий перехід від в'язкого типу руйнування до крихкого, тому для підвищення довговічності матеріалу використано спеціальний режим термосилового циклування (ТСЦ), коли при переході в мартенситний стан зовнішнє напруження різко зменшується і не викликає в мартенситі нагромадження ушкоджень. Даний режим реалізовано способом пригніченої деформації, що полягає у максимально можливому деформуванні зразків, жорсткому фіксуванні їх у цьому положенні і теплосмінах через температурні інтервали пря-

мого і зворотного фазового переходу. При цьому нагрівання в інтервалі температур зворотного мартенситного перетворення (МП) ініціює генерацію максимальних реактивних напружень, а охолодження в мартенситний стан – їхнє зменшення практично до нульових значень. Для виконавчих елементів зі сплаву ВСП-1 у вигляді циліндричних пружин стискання деформування проводили до торкання витків, температурний інтервал циклування становить 0–100°C

ТСЦ при величині деформації наведення, яка досягає граничної деформації фазової пластичності ε_{gr} , дозволяє підвищити дислокаційну границю текучості і ступінь оборотності деформації (через пригнічення каналів необоротної деформації). Це відбувається за рахунок фазового і деформаційного наклепування матеріалу, при цьому здійснюється текстуровання мартенситу, тобто утворення і переважний ріст тільки тих його кристалографічних варіантів, що забезпечують найбільшу формозміну матеріалу в напрямку прикладеного навантаження. Для сплавів на основі нікеліду титану ε_{gr} залишається постійною при різних температурах деформації нижче межі M_d (температура початку утворення наведеного мартенситу при силі наведення, що відповідає напруженню дислокаційної границі текучості). Оскільки для сплаву ВСП-1 гранична деформація становить 8–9%, то ТСЦ здійснюють при величинах деформації наведення, що досягають цих значень.

У результаті ТСЦ при вказаних умовах відбувається стабілізація деформаційно-силових і геометричних параметрів силових елементів знижується необхідне напруження наведення деформації (що визначає негативну роботу термосилового приводу), стабілізується величина сумарної залишкової деформації (тобто залишкова деформація за цикл знижується практично до нуля), що призводить до підвищення ступеня відновлення форми до 100%.

Відпалювання в заневоленому стані здійснюють при температурі, яка допускає утворення виділень надлишкових фазних компонентів (наприклад Ni_3Ti , чи його хімічні сполуки) з кристалічної структури, що стають концентраторами напружень. Тоді наступне ТСЦ із великими ступенями деформації наведення спричиняє виникнення різко анізотропної дефектної структури, у результаті чого формуються поля локальних орієнтованих у просторі мікронапружень, для яких на фазове перетворення аналогічна зовнішньому навантаженню, що робить енергетично нееквівалентними орієнтаційні варіанти мартенситу. Як наслідок, у матеріалі відбувається переважне зростання кристалів одного, найбільш сприятливого, варіанту орієнтування, що викликає в напівциклі охолодження інтенсивне накопичення деформації матеріалу в напрямку відновлення низькотемпературної форми навіть при відсутності зовнішнього навантаження. Цей ефект істотно підвищує ккд приводів із силовими елементами з ЕПФ. Підвищення температури відпалювання до температури, при якій матеріал з ЕПФ є однофазним, призводить до виродження двунатреної пам'яті.

Вибір температури відпалювання заневолених у пристосуваннях для задання форми зразків з

інтервалу проміжних температур (наприклад для сплаву ВСП-1 400–500°C) проводять в залежності від того, якими характеристиками повинні володіти силові елементи з ЕПФ. Для отримання великого збуджуваного зусилля і відновлюваної деформації температуру термообробки силових елементів наближають до нижньої границі в межах інтервалу відпалювання (для сплаву ВСП-1-400°C). Для сплаву ВСП-1 зростання зусиль відновлення становить 8–15%, величина сумарної залишкової деформації зменшується на 45–50% і, як наслідок, зростає деформація формовідновлення. Для отримання великої різниці сил при низькій і високій температурах сплав термообробляють при температурі, що наближена до верхньої границі інтервалу відпалювання (для сплаву ВСП-1-500°C). У зразків, термооброблених при температурах близьких до верхньої границі інтервалу відпалювання, напруження наведення при температурі близькій до температури початку прямого мартенситного перетворення стають надзвичайно малими.

Навивка пружин з мінімально можливим індексом $c=D/d$ і кутом підймання витка, при якому деформація зсуву матеріалу при стисканні пружини до торкання витків досягає деформації фазової пластичності, збільшує зусилля і деформації формовідновлення.

Після відпалювання та ТСЦ при запропонованих вище режимах у пружинних зразках має місце сильна і неоднорідна деформація. При цьому в периферійних областях зразка (в основному на внутрішньому волокні витків) гранична деформація $\gamma_{\text{гр}}$ повного відновлення форми перевищена, а в центрі перерізу – ні. Тоді при нагріванні вище температури закінчення зворотного мартенситного перетворення A_k розвиваються залишкові напруження (тому що в деяких волокнах повне

відновлення утруднене) пропорційні і співпадають за знаком з нереалізованою частиною відновлюваної деформації. При наступному охолодженні матеріалу нижче M_d це поле залишкових напружень викликає утворення мартенситу відповідного орієнтування, так щоб забезпечити акомодацию напружень, реалізуючи оборотний ЕПФ.

Для зразків зі сплаву ВСП-1 збільшення деформації пам'яті форми (величини формовідновлення) досягнуто шляхом збільшення кута підймання витка пружини до 20–22°, що відповідає деформації зсуву $\gamma_{\text{пмак}} \approx 9,5\%$ при стисканні пружини до торкання витків (крім цього це забезпечує зростання реактивних напружень термомеханічного відновлення і формування оборотного ЕПФ).

Якісна зміна деформаційно-силових характеристик пружинного елементу при ТСЦ зі збільшенням ступеня попередньої деформації дозволяє рекомендувати зазначені режими стабілізуючого термосилового циклування з деформацією наведення $\gamma_n^{\text{мак}}$, що досягає граничної деформації фазової пластичності, при формуванні оптимальних експлуатаційних параметрів роботи силових елементів термомеханічних приводів циклічної дії. При цьому деякий програв у термічно оборотній

деформації γ_n після ТСЦ компенсується збільшенням деформації наведення, зниженням (практично до нуля) необоротної складової $\gamma_{\text{ос}}$ де-

формації, одержанням оборотної деформації, яка досягає до 60% від максимально можливої деформації пружини, при охолодженні нижче температури закінчення прямого мартенситного перетворення, що веде до підвищення корисної роботи циклу в цілому.