

УДК 621.771.07

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.97.0.82

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СТРУКТУРИ СПЛАВІВ СИСТЕМИ СВИНЕЦЬ-СТИБІЙ

Протасенко Т. О., Федоренко Г. А.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

***Анотація.** Метою статті є дослідження впливу хімічного складу легкоплавких припоїв системи Pb-Sn на структуру та основні механічні властивості сплавів: на мікротвердість, межу міцності, плинності, відносне видовження, релаксацію напружень. Під час дослідження використані оптична мікроскопія, вимірювання мікротвердості, механічні випробування в режимах статичного розтягування та релаксації напружень.*

***Ключові слова:** м'які припої, релаксація напружень, структура, механічні властивості.*

Вступ

Для з'єднання різноманітних металевих деталей часто застосовується паяння. Деякі матеріали по-іншому просто неможливо з'єднати, тому що не всі метали можна з'єднати зварюванням. Склад і вид припоїв і флюсів вибирають відповідно до матеріалів, з яких зроблені. Будь-які припої для паяння повинні мати властивості змочування, інакше деталі неможливо буде з'єднати якісним паянням.

Найчастіше використовують у вигляді дроту різної товщини – від 0,3 мм до 3 мм. Це ті розміри, які використовують під час паяння електроніки та дротів.

Найкращий припій – чистий стибій. Однак він коштовний і використовується у виняткових випадках. Під час радіомонтажу частіше використовують олов'яно-свинцеві припої. За міцністю спаювання вони не поступаються стибію. Плавляться такі припої за температури 180–200 °С.

Внаслідок підвищення вимог до стабільності експлуатаційних характеристик паяних з'єднань і надійності виробів сучасної електронної техніки актуальним є дослідження механічних властивостей припоїв, тому необхідно правильно вибрати припій, який має оптимальний комплекс механічних і технологічних параметрів для конкретних умов експлуатації, що дозволяє одержати якісне й надійне паяне з'єднання [1–5].

Аналіз публікацій

Припої поділяються на три групи: тугоплавкі, легкоплавкі і надлегкоплавкі. До тугоплавких належать припої з температурою плавлення понад 500 °С, які мають відносно високу механічну міцність з'єднання (опір розриву до 50 кг/мм²). Недоліком їх є саме

те, що вони вимагають високої температури нагрівання, і, хоча міцність такого паяння є досить високою, інтенсивне нагрівання може призвести до небажаних наслідків: можна, наприклад, «відпустити» сталеву деталь.

До легкоплавких (радіолюбительських) належать припої з температурою плавлення до 400 °С, які мають порівняно невисоку механічну міцність (опір розриву до 7 кг/мм²). Під час радіотехнічних монтажних робіт використовують здебільшого легкоплавкі припої. До їхнього складу належать стибій і свинець у різних пропорціях, наприклад припій ПОС-61, який містить 61 % свинцю, 38 % стибію та 1 % різноманітних присадок.

Існують також сплави, до складу яких, крім стибію та свинцю, належать бісмут і кадмій. Ці сплави найбільш легкоплавкі: у деяких з них температура плавлення становить менше 100 °С. Механічна міцність з'єднання у таких сплавів досить невелика. Раніше їх застосовували для паяння кристалів у кристалічних детекторах. На сьогодні легкоплавкі кадмій-бісмутові сплави використовують для ремонту друкованого монтажу, а також для паяння транзисторів, оскільки за технічними умовами їх рекомендують паяти припоєм з температурою плавлення, яка не перевищує 150 °С [6–10].

Якщо паянню піддаються різноманітні матеріали, які мають відмінні коефіцієнти термічного розширення, то в процесі експлуатації у разі зміни температури будуть виникати термічні напруження. Тонкий прошарок припою повинен мати високі релаксаційні властивості для збереження суцільності паяного шва.

Релаксацією напружень у металі є процес самовільного падіння напруження, яке затухає в часі.

Виникнення залишкових деформацій у процесі релаксації дозволяє розглядати його як процес повзучості в разі зменшення напружень, однак механізми релаксації мають декілька особливостей щодо впливу на неї процесів дифузії та самодифузії.

Визначено, що релаксація відбувається переважно через зсувний дислокаційний механізм, який розвивається насамперед вздовж вздовж поверхонь розділу, тобто на границях зерен, блоків, вторинних фаз і вздовж площин ковзання, в яких відбувся зсув. Цей механізм релаксаційних процесів називається приграничною релаксацією. Крім того, релаксація напружень може відбуватися внаслідок дифузійних процесів у всьому об'ємі металу. Цей механізм релаксації отримав назву об'ємної [11, 12].

Пригранична релаксація обумовлена тим, що поверхні розділу не здатні протягом тривалого часу нести додані до них напруження сколювання і відбувається зсув уздовж межі, що призводить до перерозподілу доданих до них напружень. Водночас під час зняття напружень на поверхнях розділу, яке протікає за експонентним законом, відбувається їх концентрація в стиках зерен, блоках та інших вузлах жорсткості структури, що здатні нести напруження.

Об'ємна релаксація не є основним процесом в полікристалічних металах. Вона є впорядкуванням неупорядкованих ділянок кристалічної ґратки. Водночас дифузія атомів крізь поверхні розділу відсутня.

Незворотне зростання пластичної деформації в часі під час релаксації напружень робить цей процес зовні тотожним з процесом повзучості, за якого пластична деформація також безупинно наростає. Однак умови, за яких відбувається накопичення пластичної деформації, в процесах релаксації та повзучості істотно розрізняються.

Насамперед під час повзучості в умовах постійного напруження безперервне збільшення загальної (сумарної) деформації деталі (зразка) відбувається внаслідок відповідного зростання пластичної деформації. Під час релаксації напружень загальна (сумарна) деформація залишається незмінною, дорівнює початковій, а пластична деформація зростає тільки внаслідок відповідного зменшення пружної. Під час релаксації напружень процес зростання пластичної деформації відбувається всередині спочатку напруженого об'єму металу.

У процесі повзучості зростання пластичної деформації триває безперервно, іноді досягаючи значної величини. Крім того, зростання пластичної деформації відбувається за постійного навантаження і приблизно постійного (крім третього періоду) напруження. Тому за всіх інших незмінних умов пластична деформація є функцією тільки часу.

Під час релаксації напруження є постійним тільки в момент навантаження, тобто в наступні часи воно безперервно знижується. Оскільки під час релаксації пластична деформація викликається напруженням, яке є змінною величиною, то пластична деформація за сталості температури та інших умов є функцією двох параметрів (напруження та часу).

Різниця силових і деформаційних умов, за яких відбувається пластична деформація в процесах повзучості та релаксації, обумовлює їх особливості.

В області середніх гомологічних температур ($0,25-0,5T_{пл}$), в якій здебільшого працюють легкоплавкі припої, пластична деформація реалізується внаслідок переміщення дислокацій (ковзання вздовж площин зсуву та переповзання).

У процесі повзучості пластична деформація накопичується внаслідок взаємодії двох процесів: зміцнення металу і його знеміцнення (повернення). Зміцнення відбувається завдяки дії джерел генерування дислокацій з утворенням дислокаційних скупчень та інших перешкод. Повернення обумовлюється розсмоктуванням дислокаційних скупчень через переповзання крайових дислокацій (за більш високих температур) і подвійне поперечне ковзання гвинтових дислокацій.

Ділянка повзучості обумовлюється досягнутим рівнем швидкості зміцнення та знеміцнення. Джерела генерування дислокацій діють з приблизно постійною інтенсивністю, оскільки, напруження, що діє в цей момент, завжди більше, ніж критичні напруження генерування дислокацій.

Під час релаксації відбувається вичерпування (або «виснаження») легкорухомих дислокацій. У кожний наступний момент напруження менше, ніж в попередній, тому інтенсивність дії джерел безперервно зменшується в часі. Зменшення щільності легкорухомих дислокацій та їхнє зв'язування в стійкі системи призводять до зміцнення. Але за високих температур інтенсивність знеміцнення через переповзання і подвійне поперечне ковзання дислокацій (за незмінної темпера-

тури) є підвищеною. Отже, в умовах релаксації зміцнення незначне і залежить від інтенсивності зниження напруження.

Дехто з дослідників ототожнюють інтенсивність знеміцнення під час повзучості зі швидкістю релаксації напружень

У міру наближення напруження й обумовленої ним пружної деформації до нуля термодинамічна рівновага тіла відновлюється і рівень внутрішньої енергії знижується. Під час повзучості цього не спостерігається. Такими є основні відмінності в процесах релаксації напружень та повзучості (в середньотемпературній області).

Метал, який працює в умовах, що викликають релаксацію напружень, знаходиться в менш вигідних умовах, ніж метал, який піддається повзучості, оскільки під час релаксації напружень зміцнення від пластичної деформації з огляду на її обмеженість вкрай невелике [13–15].

Метою цієї роботи було дослідження впливу хімічного складу легкоплавких припоїв системи Pb–Sn, на основні механічні властивості: мікротвердість, межу міцності, плинності, відносне видовження, релаксацію напружень.

Для вирішення завдання було здійснено комплекс металографічних, механічних та аналітичних досліджень зразків в вихідному стані. Досліджувались механічні властивості припоїв ПОС-61 та ПОС-40 за кімнатної температури з розрахуванням основних характеристик міцності, пластичності, релаксації напружень: падіння напруження, залишкове напруження. Було зроблено порівняльний аналіз механічних властивостей та релаксаційної здатності цих подвійних сплавів системи Pb–Sn, проведені металографічні дослідження структури припоїв ПОС-61 та ПОС-40.

Мета і постановка завдання

Внаслідок підвищення вимог до стабільності експлуатаційних характеристик паяних з'єднань і надійності виробів електронної техніки виникає питання щодо розширення банку даних механічних властивостей припоїв. Наявна інформація про структуру та механічні властивості припоїв стосується переважно об'єктів масивного перерізу та містить суперечливі питання. Крім того, відомості відрізняються зазвичай від дійсних характеристик цих матеріалів у реальних умовах, коли припої використовуються у вигляді тонких шарів. Тому питання експлуатації ви-

робів із припоями і відповідні розрахунки мають базуватися на даних, які отримані на зразках відповідної товщини.

Метою цієї роботи є отримання достовірної інформації про механічні властивості та структури матеріалів електронної техніки – припоїв. Для вирішення цього завдання було здійснено комплекс механічних досліджень.

Дослідження структури та властивостей сплавів системи свинець-стибій

У цій роботі досліджувались зразки припоїв ПОС-40 та ПОС-61 у вигляді дроту, діаметром 3,1 мм.

З метою отримання бази даних про структуру та властивості припоїв системи Pb–Sn, які використовуються в радіотехніці, було здійснено комплекс досліджень механічних властивостей і структури за такими методами:

- проведення випробування на розтягання за статичного навантаження та в умовах релаксації напруження, вимірювання мікротвердості;

- металографічні дослідження;

Аналіз структури ПОС-40 демонструє, що на фоні дрібнозерниної евтектики (рис. 1) можна відрізнити кристали надлишкової фази, які під час первинної кристалізації утворили кристали дендритної форми. Якщо їх збільшити, у гілках дендриту можна побачити невеликі вкраплення, які ідентифікуються як вторинні кристали, що виділяються внаслідок обмеженої розчинності під час вторинної кристалізації.

Сплав ПОС-61 має концентрацію елементів, яка співпадає з евтектичною. Згідно з діаграмами стану Pb–Sn за умови наявності 62 % стибію утворюється легкоплавка суміш, яка складається з кристалів твердих розчинів α і β (α – це твердий розчин стибію у свинці, концентрація якого значно зменшується від евтектичної ($T = 183\text{ }^\circ\text{C}$) до кімнатної температури. Розчинність Pb у β твердому розчині на основі Sn є незначною за евтектичної температури та зменшується майже до 0 за кімнатної. На рис. 2 показано, що евтектика має нерегулярну будову та складається з темних кристалів довільної форми (α -фаза) на фоні більш світлих утворень β -фази. Середній розмір кристалів α -твердого розчину менше 1 мкм, тобто евтектична суміш, що утворилась у процесі кристалізації, досить тонко диференційована.

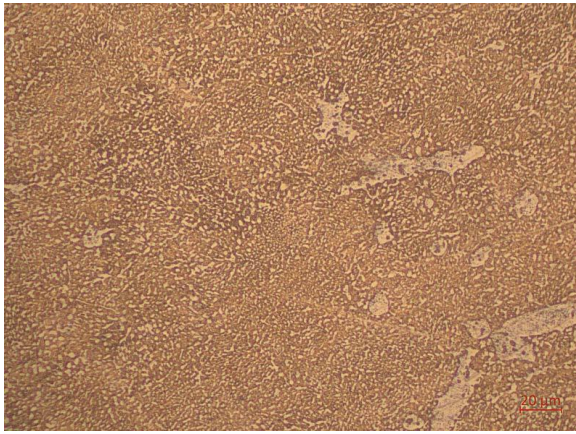


Рис. 1. Мікроструктура припою ПОС-40, $\times 500$

Мікротвердість вимірювалась за стандартною методикою через вдавлювання алмазного індентора у вигляді піраміди з навантаженням 10 гр. (0,1 Н). З метою отримання достовірних даних про твердість двофазної структури припоїв на кожному зразку здійснювали до десяти вимірювань, потім розраховували середньоарифметичне значення та визначали середнє значення мікротвердості в МПа.

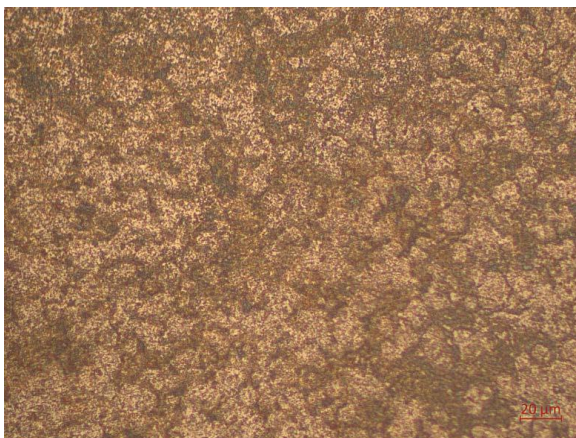


Рис. 2. Мікроструктура припою ПОС-61, $\times 500$

За цими даними була визначена мікротвердість кожного сплаву (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати вимірювання мікротвердості сплавів

ПОС-61	ПОС-40
243,9 МПа	185,1 МПа

Вихідні компоненти сплавів системи свинець-стийбій мають невелику твердість. Твердість чистого Рb дорівнює 60 МПа, а чистого Sn – 76 МПа. Твердість припоїв є більші високою через твердорозчинне зміцнення вна-

слідок утворення твердих розчинів на основі Sn та Рb. Пояснити збільшення твердості внаслідок наклепу дроту неможливо, тому що температура рекристалізації цих сплавів значно нижче, ніж кімнатна, та знаходиться в області від'ємних температур.

Порівняльна характеристика твердості вихідного матеріалу та сплавів на їхній основі наведена на рис. 3.

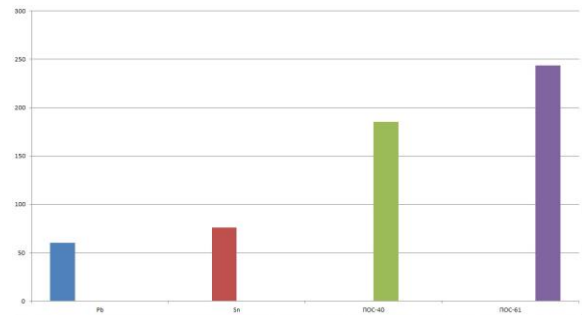


Рис. 3. Твердість припоїв ПОС-61 і ПОС-40 та компонентів сплавів у вільному стані

За первинними діаграмами розтягу було визначено основні характеристики міцності та пластичності.

- σ_b – тимчасовий опір розриву, МПа
- $\sigma_{0,2}$ – умовна межа плинності, МПа
- δ – відносне видовження, %

Результати розрахунків наведені в табл. 2 та на рис. 4. Відповідно до цих даних, загальний рівень міцневих характеристик є невисоким в обох сплавах, хоча в ПОС-61 він вище, ніж у ПОС-40, зокрема значне розходження в результатах отримано за умовною межею плинності. Якщо в ПОС-61 σ_b вище на 4 %, як порівняти з ПОС-40, то $\sigma_{0,2}$ перевищує вже на 36 %. Протилежна залежність має пластичність. У ПОС-40 δ вище на 31 %, ніж у ПОС-61, хоча ці два сплави є досить пластичними через наявність у їхній структурі високодисперсної евтектики, яка складається з нерегулярної суміші двох твердих розчинів.

У деталях, які перебувають у напруженому стані, у процесі тривалого витримування за кімнатної температури накопичується рівень залишкової деформації. Це призводить до переходу частини пружної деформації у пластичну, тобто до релаксації напружень.

Таблиця 2 – Результати вимірювань на розтяг зразків ПОС-61 і ПОС-40

Зразки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
ПОС-40	22,47	14,63	37,1
ПОС-61	23,36	19,87	28,3

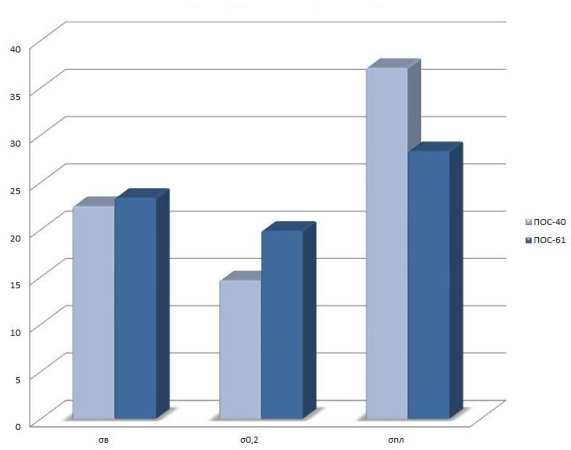


Рис. 4. Результати вимірювань на розтяг зразків ПОС-61 і ПОС-40

Релаксація – це процес переходу кристалічного тіла з нерівноважного стану у більш рівноважний. Релаксація напружень спостерігається за різних температур, зокрема й близьких до абсолютного 0.

Релаксація напружень за підвищених і високих температур є процесом, який треба враховувати під час аналізу напруженого стану різних деталей, а також паяного шва.

Припої ПОС-40 і ПОС-61, які досліджувались, належать до легкоплавких, а температура утворення рідини відповідає 183 °С, що дорівнює за абсолютною шкалою 456 К, тоді кімнатна температура (20 °С = 293 К) буде відповідати 0,64 $T_{пл}$. Тобто процеси, що відбуваються у спаї, який перебуває в умовах експлуатації, є високотемпературною релаксацією напружень (більше ніж 0,5 $T_{пл}$), яка контролюється дифузійним механізмом переміщення дислокацій.

Фактори, які впливають на процес релаксації напружень, можна поділити на внутрішні та зовнішні.

Внутрішні залежать від матеріалу, який випробовується, а зовнішні від нього не залежать.

До внутрішніх факторів належать хімічний склад сплаву, макро- та мікроструктура, технологічні особливості.

До головних зовнішніх факторів належать температура, масштабний фактор, попередня пластична деформація;

Ні хімічний склад, ні мікроструктура не мають значного впливу на релаксаційні властивості цих сплавів. Про це свідчать дані, наведені в табл. 3, 4 і на рис. 5, 6, де подано процес кривих релаксації напружень у двох сплавах, які досліджувались. Дві залежності релаксації напружень від часу ідентичні, різ-

ниця в них незначна, тому ці фактори не є визначальними.

Щодо технологічних властивостей, то вплив наклепу під час пластичного деформування дроту, який є основою для виготовлення зразків на розтяг, можна не враховувати, тому що кімнатна температура є температурою гарячої деформації.

Про це свідчать наведені знімки мікроструктури зразків, на яких відсутня текстурованість структури.

Початкове напруження σ_0 має суттєвий вплив на процес релаксації напружень, а отже, і на величину напруження σ_i , яке залишилось у зразку через певний період часу.

Зі збільшенням σ_0 процес релаксації напружень у початковому періоді інтенсифікується. Чим вищою є гомологічна температура випробованого матеріалу, тим більшого значення набуває цей процес. Початкове напруження впливає не стільки на абсолютну величину падіння напруження $\Delta\sigma$, скільки на швидкість його зниження.

Таблиця 3 – Показники релаксації напружень ПОС-61, $\sigma_0/\sigma_{0,2} = 1,05$

Номер вимірювання	τ , с	σ_i , МПа	$\Delta\sigma$, МПа	$\Delta\sigma$, %
1	4	16,96	4,74	21,8
2	10	14,31	7,39	34,1
3	14	12,19	9,51	43,8
4	20	11,13	10,57	48,7
5	30	9,54	12,16	56
6	40	7,95	13,75	63,3
7	50	6,89	14,81	68,2
8	60	6,36	15,34	70,7
9	80	5,3	16,4	75,6
10	100	4,24	17,46	80,5
11	120	3,71	17,99	82,9
12	140	3,45	18,25	84,1
13	180	2,65	19,05	87,8
14	220	2,12	19,58	90,2
15	260	1,89	19,81	91,3
16	300	1,59	20,11	92,6
17	360	1,32	20,36	93,9

Під час проведення досліджень припоїв було вибрано незначне початкове напруження, і для обох сплавів воно дорівнює $\sigma_0/\sigma_{0,2} = 1,05$. Швидкість зниження напруження за перші 50 с дорівнює для 0,21 МПа/с, а для ПОС-40 – 0,18 МПа/с, що є досить значною величиною.

Вплив часу на процес релаксації напружень знаходиться у тісному взаємозв'язку від інших факторів – початкового напруження, температури, структурної стабільності сплаву, який досліджується. З підвищенням температури вплив фактора часу посилюється.

Зазвичай дослідження релаксації напружень тривають досить певний час, іноді декілька місяців. У цій роботі був вибраний доволі короткий інтервал випробування – 15 хвилин, тому що в паяному з'єднанні важливі перші хвилини, навіть секунди, які регламентують цілісність шва завдяки процесу релаксації.

Таблиця 4 – Показники релаксації напружень ПОС-40, $\sigma_0/\sigma_{0,2} = 1,05$

Номер вимірювання	τ , с	σ_i , МПа	$\Delta\sigma$, МПа	$\Delta\sigma$, %
1	2	14,85	2,19	12,85
2	6	11,88	5,16	30,28
3	10	10,53	6,51	38,2
4	16	9,72	7,32	43
5	26	8,37	8,67	50,9
6	36	7,56	9,48	55,6
7	46	6,76	10,29	60,38
8	56	6,21	10,83	63,56
9	76	5,4	11,64	69,3
10	96	4,86	12,18	71,4
11	116	4,32	12,72	74,64
12	136	4,05	12,99	76,23
13	176	3,51	13,53	79,4
14	216	2,97	14,07	82,57
15	256	2,7	14,34	84,15
16	296	2,43	14,61	85,7
17	412	2,16	14,88	87,3
18	462	1,89	15,15	88,9
19	542	1,62	15,42	90,5
20	652	1,35	15,69	92,1
21	762	1,22	15,82	92,8

Дослідження впливу розмірів зразка на інтенсивність процесів релаксації напружень є досить обмеженими. Існує припущення, що різна релаксаційна стійкість зразків різних розмірів є результатом локального типу протікання невеликих пластичних деформацій за високих температур. Хоча зразки, які досліджувалися, мали невеликий розмір перерізу, але в паяному шві вони є тонким шаром, тому це може бути фактором похибки в результатах.

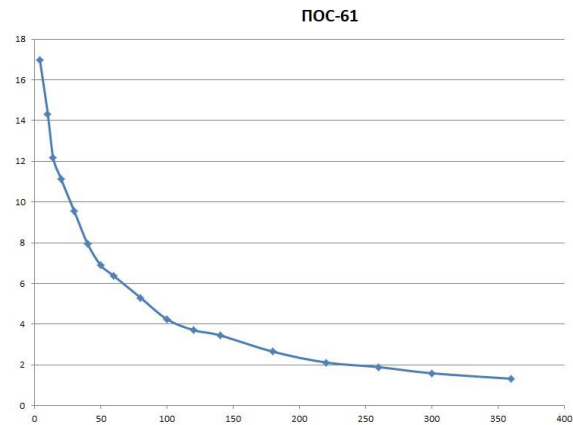


Рис. 5. Крива релаксації напружень у припої ПОС-61

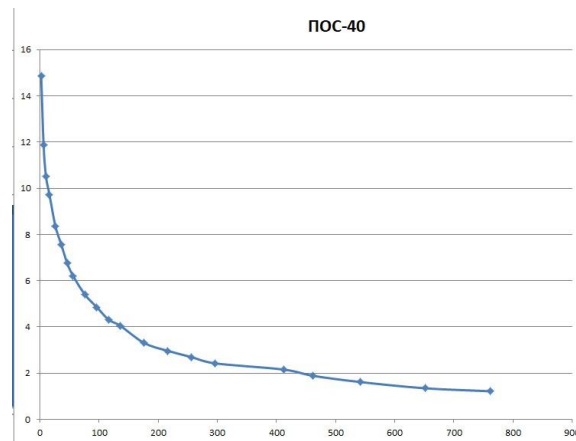


Рис. 6. Крива релаксації напружень у припої ПОС-40

Відповідно до результатів досліджень релаксації напружень у зразках ПОС-61 і ПОС-40, можна дійти таких висновків: динаміка й глибина релаксації напружень в обох сплавах досить високі та практично однакові, що дозволяє зробити припущення, що ці припої обох марок здатні швидко і значною мірою знизити механічні напруження, які виникають у спаї. Так, згідно з рис. 5 та 6 у ПОС-61 90 % прикладеного напруження знімається через 230 с, а в ПОС-40 – через 580 с.

Така висока здатність до релаксації напружень є позитивною щодо експлуатаційних характеристик виробів, спаяними цими припоями.

Висновки

1 Твердість припоїв ПОС-40 і ПОС-61 є значно вищою, як порівняти з твердістю чистих компонентів, з яких вони утворені.

2 Механічні дослідження демонструють, що характеристики міцності у припої

ПОС-40 нижчі, а пластичність більш висока, ніж у ПОС-61.

З Обидва сплави мали приблизно однакові релаксаційні властивості та протягом 100 секунд напруження зменшилось на 70–80 %. Ці дані свідчать про високу здатність матеріалів, які досліджувалися, до знімання напружень, які виникають у сплаві.

4 Згідно з металографічними дослідженнями структурний стан сплавів, які досліджувалися, відповідає діаграмі Pb-Sn

5 Отримані в процесі досліджень дані про властивості та структуру припоїв ПОС-40 та ПОС-61 можна використовувати в практичній діяльності.

Література

1. Физическое материаловедение: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Ядерные физика и технологии": в шести томах / В. В. Нечаев и др. Москва: Московский инженерно-физ. ин-т (гос. ун-т), 2007. Т. 5: Материалы с заданными свойствами. 2008. 671 с.
2. Перевезенцев Б. Н., Шашкин О. В. Теоретические основы пайки: электронное учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2018. 132 с.
3. Лучкин Р. С. Прочность и надежность паяных конструкций: электронное учебное пособие. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2014. 164 с.
4. Федоров А. Л., Краснопевцев А. Ю., Шашкин О. В. Технология изготовления паяных конструкций: учебно-методическое пособие. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2013. 62 с.
5. Тазетдинов, Р. Г. Физико-химические основы технологических процессов производства и обработки конструкционных материалов: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по машиностроительным специальностям. Москва: ИНФРА-М, 2014. 400 с.
6. Технология межсоединений электронной аппаратуры: учебник / В. В. Семенец и др. Харьков: Компания "СМИТ", 2005. 432 с.
7. Федоров А. Л. Технология и оборудование низкотемпературной пайки: учебное пособие. Тольятти: Тольяттинский государственный университет (ТГУ), 2021. 127 с.
8. Літовченко П. І., Іванова Л. П. Технологія конструкційних матеріалів: навчальний посібник. Харків: НАНГУ, 2016. 306 с.
9. Технологія електронної техніки: у 2 т. / З. Ю. Готра. Львів: Видавництво Національного університету Львівська політехніка, 2010. 884 с.
10. Нероз'ємні з'єднання в машинобудуванні: навчальний посібник / О. В. Кулик та інші. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2010. 56 с.
11. Канарчук В. С., Шевченко В. І. Методи дослідження металів: навч. посіб. Київ: НТУ КПІ, 2001. 98 с.
12. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов: учеб. для вузов. Москва, МИСИС, 1998. 400 с.
13. Борздыка А. М., Гецов Л. Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. Москва: Металлургия, 1978. 256 с.
14. Гинцбург Я. С. Релаксация напряжений в металлах. Москва: Металлургиздат, 1957. 170 с.
15. Релаксационные явления в твёрдых телах. Труды IV всесоюзной научной конференции. Москва, Металлургия, 1968. 260 с.

References

1. *Fizicheskoe materialovedenie* [Physical materials science] : a textbook for students of higher educational institutions studying in the direction of "Nuclear physics and technology": in six volumes / Nechaev V. V et al. Moscow, Moscow Engineering Physics. institute (state university). 2007. V. 5: Materials with desired properties 2008. 671 p.
2. Perevezentsev B. N., Shashkin O. V. *Teoreticheskie osnovy pajki* [Theoretical foundations of soldering]: an electronic textbook. Togliatti: TSU, 2018. 132 p.
3. Luchkin R. S. *Prochnost' i nadezhnost' payanykh konstrukcij* [Strength and reliability of brazed structures]: an electronic study guide. Togliatti: Togliatti State University, 2014. 164 p.
4. Fedorov A. L., Krasnopevtsev A. Yu., Shashkin O. V. *Tekhnologiya izgotovleniya payanykh konstrukcij* [Technology for the manufacture of brazed structures]. Teaching aid. Togliatti: Togliatti State University, 2013. 62 p.
5. Tazetdinov R. G. *Fiziko-himicheskie osnovy tekhnologicheskikh processov proizvodstva i obrabotki konstrukcionnykh materialov* [Physical and chemical foundations of technological processes for the production and processing of structural materials]: a textbook for university students studying in engineering specialties. Moscow: INFRA-M, 2014. 400 p.
6. *Tekhnologiya mezhsjoedinenij elektronnoj apparatury* [Technology of interconnection of electronic equipment] / V. V. Semenets et al. Kharkov: SMIT Company, 2005. 432 p.
7. Fedorov A. L. *Tekhnologiya i oborudovanie nizkotemperaturnoj pajki* [Technology and equipment for low-temperature soldering]: a tutorial. Togliatti: Togliatti State University (TSU), 2021. 127 p.
8. Litovchenko P. I., Ivanova L. P. *Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv* [Construction materials technology]. Tutorial. Kharkiv: NANGU, 2016. 306 p.
9. *Tekhnolohiia elektronnoi tekhniki* [Technology of electronic equipment] / Gotra Z. Yu. Vol. 2. Education. manual in 2 volumes. Lviv: Publishing

- House of the National University of Lviv Polytechnic, 2010. 884 p.
10. *Neroziemni ziednannia v mashynobuduvanni* [Integral connections in mechanical engineering]. Tutorial / O. V. Kulyk and other. Dnipropetrovsk: RVV DNU, 2010. 56 p.
 11. Kanarchuk V. E., Shevchenko V. I. *Metodi doslidzhennya metaliv* [Methods for the study of metals: navch. Posib]. Kiev: NTU KPI, 2001. 98 p.
 12. Zolotorevsky V. S. *Mekhanicheskie svojstva metallov* [Mechanical properties of metals: textbook. for universities]. Moscow: MISIS, 1998. 400 p.
 13. Borzdyka A. M., Getsov L. B. *Relaksaciya napryazhenij v metallah i splavah* [Stress relaxation in metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1978. 256 p.
 14. Gintsburg Ya. S. *Relaksaciya napryazhenij v metallah* [Relaxation of stresses in metals]. Moscow: Metallurgizdat, 1957, 170 p.
 15. *Relaksacionnye yavleniya v tvordyh telah* [Relaxation phenomena in solids]. Proceedings of the IV All-Union Scientific Conference / ed. V.S. Postnikov. Moscow: Metallurgy, 1968. 260 p.

Протасенко Тетяна Олександрівна, доцент кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707 – 64 –35, e-mail: 290954protas@gmail.com

Федоренко Ганна Анатоліївна, інж. I кат, кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707 – 64 –35, e-mail: ann161169@gmail.com, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Investigation of properties and structure of alloys of the lead-stibium system

Abstract. Problem. The problem is to obtain a database on the structure and properties of Pb-Sn solders, which are widely used in radio engineering. **Target.** The purpose of this work was to study the influence of the chemical composition of low-melting solders of the Pb-Sn system on the main mechanical properties and structure. **Method.** To achieve this goal, a complex of metallographic, mechanical and analytical studies of samples in the initial state was carried out. **Results.** The hardness of POS-40 and POS-61 solders turned out to be significantly higher compared to the hardness of the pure components from which they are formed. Mechanical studies have shown that the strength characteristics in POS-40 solder are lower, and ductility is higher than in POS-61. Both alloys had approximately the same relaxation properties and within 100 seconds the stress decreased by 70-80 %. These data testify to the high ability of the materials that were studied to relieve stresses arising in the junction. Metallographic studies have shown that the structural state of the alloys that have been studied corresponds to the Pb-Sn diagram. The data obtained as a result of research on the properties and structure of POS-40 and POS-61 solders can be used in practice.

Keywords: soft solders, microhardness, tensile strength, yield strength, relative elongation, stress relaxation., structure.

Protasenko Tetiana Oleksandrivna, Associate Professor of Materials Science Department, tel.: (057) 707 – 64 –35, e-mail: 290954protas@gmail.com
Fedorenko Anna Anatolyevna, eng. I category, tel.: (057) 707 – 64 –35, e-mail: ann161169@gmail.com, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.