

Т. О. ПРОТАСЕНКО, О. М. РЕБРОВА, М. С. СВИНАРЕНКО, О. Ю. РЕБРОВ

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МІДНОЇ ФОЛЬГИ ВАКУУМНОЇ ПЛАВКИ

Підвищення надійності вузлів і конструкцій, ефективності машин та обладнання різного призначення вимагають розробки і застосування нових матеріалів, які здатні працювати у важких умовах при низьких або високих температурах, в агресивних середовищах, при великих навантаженнях, зокрема, високоміцних металів і сплавів, композиційних та неметалічних матеріалів. Багато з цих матеріалів погано з'єднуються зварюванням плавленням. Тому для багатьох нових матеріалів паяння, яке забезпечує з'єднання нижче температури автономного плавлення основного металу, стало найбільш надійним, а іноді і єдиним способом виробництва деталей та вузлів. Це перш за все відноситься до паяння неметалічних матеріалів, металів з неметалами, металів, схильних до утворення тріщин при зварюванні плавленням. Внаслідок підвищення вимог до стабільності експлуатаційних характеристик паяних з'єднань і надійності виробів електронної техніки виникає питання про отримання даних про фізико-механічні властивості припоїв у вигляді фольги. Метою даної роботи є отримання даних про вплив температури на механічні властивості твердого припою марки МВ у вигляді фольги, а також оцінка релаксаційної стійкості визначеного матеріалу в заданому інтервалі температур. Для вирішення цього завдання проводився комплекс механічних досліджень з метою оцінки механічних властивостей припоїв, кінетики релаксації напружень у різних температурних інтервалах, а також мікроструктурні дослідження фольги. Визначена методика вивчення механічних властивостей припоїв при короткочасних і більш тривалих випробуваннях.

Ключові слова: фольга, мідь, припій, міцність, пластичність, релаксація напружень, мікроструктура

T. PROTASENKO, O. REBROVA, M. SVINARENKO, O. REBROV

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF VACUUM-MELTED COPPER FOIL

Increasing the reliability of assemblies and structures, the efficiency of machines and equipment for various purposes require the development and application of new materials that are capable of operating in difficult conditions at low or high temperatures, in aggressive environments, under heavy loads, in particular, high-strength metals and alloys, composite and non-metallic materials. Many of these materials are poorly joined by fusion welding. Therefore, for many new materials, soldering, which provides a connection below the autonomous melting temperature of the base metal, has become the most reliable, and sometimes the only way to produce parts and assemblies. This primarily applies to soldering non-metallic materials, metals with non-metals, metals prone to cracking during fusion welding. Due to increased requirements for the stability of the operational characteristics of soldered joints and the reliability of electronic products, the question arises of obtaining data on the physical and mechanical properties of solders in the form of foil. The purpose of this work is to obtain data on the influence of temperature on the mechanical properties of MV brand brazing solder in the form of foil, as well as to assess the relaxation resistance of a given material in a given temperature range. To solve this problem, a set of mechanical studies was carried out to assess the mechanical properties of solders, the kinetics of stress relaxation in different temperature ranges, as well as microstructural studies of the foil. A methodology for studying the mechanical properties of solders during short-term and longer tests was determined.

Keywords: foil, copper, solder, strength, plasticity, stress relaxation, microstructure

Вступ. Актуальність задачі. Паяння матеріалів застосовують у багатьох галузях техніки, а іноді воно є єдиним надійним та ефективним способом з'єднання матеріалів. Надзвичайно важливе промислове значення має високотемпературне паяння при температурах вище 450°C. Це перш за все це відноситься до виробів, у яких використовуються композиційні та неметалічні матеріали, жароміцні нікелеві сплави, тугоплавкі метали, які не з'єднуються зварюванням плавленням.

При з'єднанні багатьох металічних матеріалів (тугоплавкі метали та їх сплави, жароміцні нікелеві та кобальтові сплави зі спрямованою кристалізацією, композиційні матеріали) не допускається їх розплавлення та перегрівання вище від певної температури через втрату ними їх будови та властивостей. Цього завжди можна уникнути, вибираючи відповідні припої та спосіб паяння. Паяння має переваги також перед зварюванням тиском, оскільки не потребує пластичної деформації з'єднуваних матеріалів. При загальному нагріванні виробу для паяння не

мають значення площа з'єднання, кількість швів, також відсутня проблема напружень і деформацій при з'єднанні неоднорідних металів. Процеси паяння легко піддаються механізації та автоматизації [1–3].

При паянні формування шва йде шляхом заповнювання припоєм зазору між деталями, які з'єднуються, тобто процес паяння у більшості випадків пов'язаний з капілярною текучістю, яка не має місця при зварюванні плавленням. На відміну від зварювання, паяння не пошкоджує структуру матеріалів, що з'єднуються, хоча невелике потовщення в місці пайки все ж помітне. Паяння може бути здійснено при низьких температурах, які лежать нижче температури плавлення основного металу. Температуру підбирають таким чином, щоб не було пошкоджень поверхні або переплавлення, а з'єднання було пластичним [4, 5].

Використання в якості припоїв металів із нижчою температурою плавлення, ніж основного металу, ослаблює спаяне з'єднання. Ця проблема

© Т. О. Протасенко, О. М. Реброва,
М. С. Свиноаренко, О. Ю. Ребров, 2026

чітко проявляється при паянні виробів, які працюють в умовах підвищених температур та інтенсивного навантаження, і повинна враховуватися при проектуванні паяних конструкцій, технологій та виборі способу паяння. Тому важливо знати механічні властивості матеріалу припою з урахуванням геометричних розмірів, тому що значне зменшення перерізу може суттєво змінити основні характеристики міцності і пластичності металу або сплаву [3, 6].

Друга проблема паяння, як і інших способів з'єднання матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, пов'язана з формуванням власних напружень у з'єднанні. Напруження, що зазнають релаксації, неминуче виникають в процесі з'єднання деталей (технологічні напруження). Можливість отримання надійних спаїв однієї і тієї ж конфігурації визначається розмірами вузла, оскільки при цьому внаслідок різниці температурних осідань, яка залежить від лінійних розмірів деталей, змінюється величина механічного напруження. Часто ці напруження призводять до руйнування спаїв. Напруження в з'єднаних деталях можна уникнути тільки в разі ідеального збігання температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів, які з'єднуються в усьому інтервалі температур: від кімнатної температури до температури твердіння припою. Практично такої ідеальної пари поки знайти не вдалося [7–9].

У кожному конкретному випадку припій обирається в залежності від фізико-хімічних властивостей матеріалів, з яких виготовлені поєднувані деталі; від температурних обмежень; розмірів деталей; від вимог щодо потрібних якостей спаю (його механічної міцності, жаротривкості, корозійної стійкості, електропровідності, довговічності і загальної вартості), а також від способу паяння та технологічних умов її здійснення.

З'єднання металевих матеріалів виконується за допомогою металевих припоїв. Тверді припої мають значну механічну міцність і можуть мати границю міцності σ_b до 500 МПа, м'які припої, як правило, мають σ_b не вище (50–70) МПа [3, 8, 10–15].

Чиста мідь марок М00, М0 з мінімальним вмістом кисню, вісмуту, свинцю та інших шкідливих домішок може успішно застосовуватися для пічного паяння заліза, сталей, нікелю. Вона добре змочує ці матеріали, легко затікає в капілярні зазори і дає можливість отримувати з'єднання по великій площі при нанесенні її електролітичним або іншим методом на поверхню шару товщиною 3...15 мкм та паянні у вакуумі або відновлювальному газовому середовищі. Температура паяння міддю знаходиться в інтервалі 1100...1130 °С залежно від легування сталей і сплавів. Недоліком міді як припою є висока температура паяння і схильність до утворення кристалізаційних тріщин за рахунок утворення евтектики Cu–Cu₂O при недостатньому захисті або використанні недостатньо розкисненої міді [1–5].

Залежно від технології здійснення паяння, розмірів та особливостей деталей, що спаюються,

припій може мати вигляд: дроту; прутків; трубок діаметром від 0,3 до 5 мм, заповнених флюсом (каніфоллю); спеціальних стрічок фольги, яким заздалегідь надається форма відповідно до розмірів деталей; порошків; паяльних паст, які складаються із порошку припою і рідкого флюсу; суспензій [1, 16–19].

Досліджуваний мідний припій – марки МВ у вигляді фольги товщиною 0,05 мм, який використовується в якості твердого припою при отриманні з'єднань виробів електронної техніки.

Зважаючи на це, метою даного дослідження було отримання даних про вплив температури на механічні властивості твердого припою марки МВ у вигляді фольги, а також оцінка релаксаційної стійкості визначеного матеріалу в заданому інтервалі температур.

Експериментальна частина. В якості матеріалу дослідження були обрані зразки твердого мідного припою марки МВ у вигляді фольги товщиною 0,05 мм. Це мідь вакуумної плавки, яка характеризується підвищеною чистотою – 99,99% Cu і зниженим вмістом шкідливої домішки O₂.

Механічні випробування в режимі активного розтягання припою МВ проводилися для матеріалу в стані постачання при $t = 20^\circ\text{C}$ і для відпаленого протягом 1,5 год при $t = 600^\circ\text{C}$. Температури випробувань становили 20°C, 200°C, 400°C, 600°C.

В роботі також проводилися дослідження релаксації напружень у припої, які можуть виникати в паяному з'єднанні при термоциклічному режимі роботи або в області підвищених температур і відповідним чином впливати на його службові властивості. Для випробувань на розтяг і релаксацію напружень використовувались плоскі зразки з отворами, в які вставлявся поперечний стрижень, що проходив через захоплювачі розривної машини жорсткого типу з автоматичним записуванням діаграми розтягання (рис. 1).

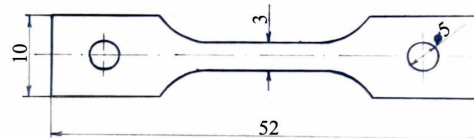


Рисунок 1 – Зразок для випробувань на одновісний розтяг та релаксацію напружень

Для дослідження структури металу використовували металографічний метод.

Металографічний аналіз припою МВ у вихідному і відпаленому стані показав, що фольга має різко відмінні структури.

Структура припою МВ у вихідному стані (рис. 2) є нерівновісними зернами овальної форми, витягнутими у напрямку прокатування, тобто має місце текстурованість структури. Чіткі границі між зернами мають нерівну форму. Присутнє характерне для міді різне забарвлення зерен, яке обумовлено анізотропією властивостей у різних

напрямах.

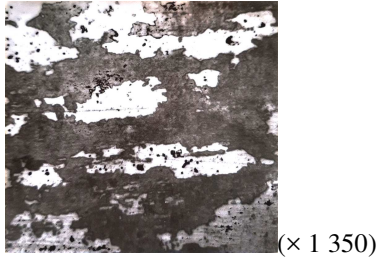


Рисунок 2 – Мікроструктура припою МВ у стані постачання

Мікроструктура припою МВ, відпаленого протягом 1,5 год при $t = 600^{\circ}\text{C}$, відповідає структурному складу відпаленої міді. Мікроструктура є рівновісними зернами з чіткими прямолінійними границями. Для відпаленої міді характерна розвинена двійникова структура (рис. 3). Така досить груба крупнозерниста структура з розміром зерна, порівнянню з товщиною фольги («бамбукова» будова), буде мати невисокі значення міцності.

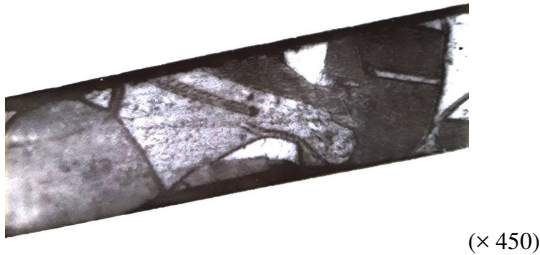


Рисунок 3 – Мікроструктура припою МВ після відпалення при 600°C

В роботі досліджувалися наступні механічні характеристики: границя пружності ($\sigma_{0,05}$), границя плинності ($\sigma_{0,1}$, $\sigma_{0,2}$), границя міцності (σ_b), пластична деформація ($\epsilon_{пл}$). Деформування здійснювалося з постійною швидкістю 1,2 мм/хв.

Оскільки припій МВ, що досліджується, застосовується для з'єднання деталей із різномірних матеріалів з різними температурними коефіцієнтами розширення, що працюють у циклічному температурному режимі або в режимі підвищених температур від 20°C до 600°C , то найбільш важливою характеристикою механічних властивостей є границя плинності $\sigma_{0,1}$ і пластичність $\epsilon_{пл}$.

Короткочасні механічні випробування в режимі активного розтягу припою МВ проводилися для матеріалу у стані постачання при температурі 20°C і для відпаленого зразків при температурах 20°C , 200°C , 400°C , 600°C .

При кімнатній температурі, яка для міді становить $0,21 T_{пл}$, границя плинності вихідного зразка дуже висока і становить $\sigma_{0,1} = 158 \text{ МПа}$. Це пояснюється досить жорсткими умови виготовлення зразка (значна ступінь прокатування), у процесі якого відбувається значний наклеп матеріалу, підвищується ступінь його дефектності. Оскільки при випробуванні вихідного матеріалу при більш високих

температурах на процеси деформаційного зміцнення будуть істотно впливати процеси відновлення і рекристалізації, які йдуть паралельно, було вирішено проводити їх тільки для відпалених зразків. Температура рекристалізації технічно чистої міді зазвичай становить $150\text{--}270^{\circ}\text{C}$. Цей процес залежить від ступеня попередньої деформації, чистоти металу та часу нагріву: чим вища деформація, тим нижча температура рекристалізації. Для надчистої міді вона може починатися від 80°C .

Із рис. 4 видно, що при підвищенні температури випробувань характеристики міцності відпаленої фольги припою МВ знижуються, причому з різною інтенсивністю.

Так, якщо при $t = 20^{\circ}\text{C}$ ($0,21 T_{пл}$) середнє значення границі текучості становить 35 МПа, то при $t = 200^{\circ}\text{C}$ ($0,34 T_{пл}$) його значення дорівнює 23 МПа, тобто знизилось на третину, тоді як у температурному інтервалі $200\text{--}600^{\circ}\text{C}$ спостерігається незначне зниження. При $t = 400^{\circ}\text{C}$ ($0,49 T_{пл}$) границя плинності становить $\sigma_{0,1} = 20 \text{ МПа}$, а при $t = 600^{\circ}\text{C}$ ($0,64 T_{пл}$) – $\sigma_{0,1} = 18 \text{ МПа}$.

Відносне видовження припою МВ при $t = 20^{\circ}\text{C}$ становить $\delta = 7,5\%$, а при 200°C – $\delta = 9,1\%$, таким чином, в даному температурному інтервалі пластичні характеристики припою підвищуються на 21% (табл. 1). Потім в інтервалі $200\text{--}400^{\circ}\text{C}$ спостерігається різке зниження пластичності, відносне видовження досягає всього $\delta = 2\%$. Подальше збільшення температури до 600°C призводить до деякого підвищення пластичності до $\delta = 5,1\%$.

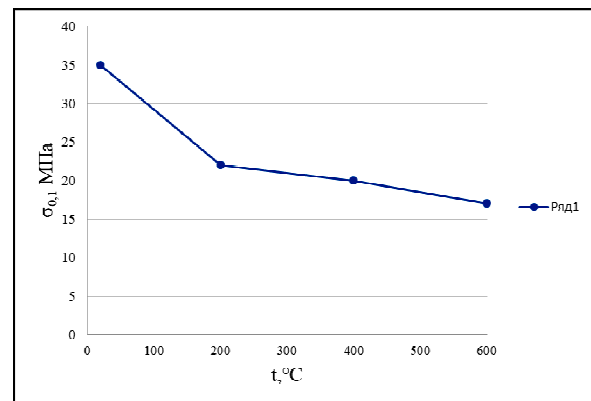


Рисунок 4 – Зміна границі плинності припою МВ залежно від температури випробування

Таблиця 1 – Зміна пластичності припою МВ залежно від температури випробування

$T, ^{\circ}\text{C}$	20	200	400	600
$\delta, \%$	7,5	9,1	2,0	5,1

Такий «провал» пластичності добре узгоджується з деякими літературними джерелами [6, 8], але для достовірного пояснення явища, яке спостерігається, необхідно отримати більш конкретні відомості про хімічний склад припою МВ. Зниження значень $\sigma_{0,1}$ з підвищенням температури випробувань можливо пояснити наступним чином.

При високотемпературному деформуванні переміщення дислокацій відбувається під дією одночасно діючих зовнішніх напружень і температурного впливу. Тут дислокації не прив'язані до «своїх» площин ковзання і можуть легко проходити з однієї площини в іншу, вибираючи собі найлегший шлях. При такому довільному і нерегульованому русі дислокацій необхідно менше напруження для подолання ними різних бар'єрів. Як наслідок – зниження міцності та збільшення пластичності.

У роботі проводились дослідження релаксації напружень у мідній фользі, які виникають внаслідок різних термічних коефіцієнтів розширення деталей паяного виробу в процесі експлуатації при нагріванні до різних температур. Напружений стан, який буде виникати у припої, відповідним чином впливає на його службові властивості.

Напруження розтягу, а також велика ступінь деформації можуть бути дуже небезпечними для паяних з'єднань і призвести до їх руйнування. Тому ступінь релаксації та швидкість протікання релаксаційних процесів є досить важливими характеристиками для паяних з'єднань, які періодично працюють у напруженому стані. Представляє інтерес також вплив зміни температури на кінетику релаксаційних процесів, оскільки з'єднання, що виконані методом паяння припоями, які досліджуються, повинні працювати в умовах температур, які змінюються циклічно.

Дослідженню на релаксаційну стійкість піддавався припій марки МВ в різних умовах. При знятті кривих релаксації вибір напруження релаксації здійснюється в інтервалі $\sigma_{0,2} < \sigma_p \leq \sigma_b$ і при сталій величині загальної деформації $\epsilon_{заг}$, знімалася крива спадання напруження у зразку в заданому проміжку часу. Проводився порівняльний аналіз кінетики протікання релаксаційних процесів у припої даної марки при різних температурах і напруженнях, нормованих на границю текучості. Дослідження відбувалися при кімнатній і підвищеній температурах. За розрахунками релаксаційних кривих будувалися графіки в координатах σ_τ (МПа) – τ (с), $\ln[-\sigma] - \sigma_\tau$.

Відомо, що критичне напруження можна представляти двома складовими:

$$\tau_{кр} = \tau^* + \tau_\sigma \quad (1)$$

де τ^* – температурнозалежна складова;

τ_σ – атермічна складова.

Дислокації при своєму масовому русі повинні долати близькодіючі перешкоди, тобто значні поля напружень, які спостерігаються лише на відстанях, рівних декільком міжатомним, і далекодіючі – поля напружень яких відчужаються на відстанях декількох десятків параметрів ґратки і більше. До перших відносяться бар'єри Пайерлса–Набарро, точкові дефекти, атмосфери домішок біля дислокацій, ліс дислокацій, до других – дислокації в паралельних площинах ковзання, різні бар'єри дислокацій, скупчення дислокацій.

В інтервалі $(0,2 - 0,4) T_{пл}$ енергія температурних флуктуацій достатня для подолання дислокаціями полів напруження близькодіючих перешкод (дефекти упакування, атмосфери Котрелла, точкові дефекти, ліс дислокацій). При температурі $(0,5 - 0,7) T_{пл}$ тільки енергії теплових флуктуацій буде достатньо, щоб подолати близькодіючі перешкоди, а зовнішнє напруження буде витрачатися на подолання далекодіючих перешкод. Як відомо [5], збільшення температури призводить до різкого підвищення концентрації точкових дефектів і дислокації із заблокованих площин ковзання переходять у більш вільні. Тобто, при високих температурах значною мірою розвивається рух точкових дефектів, і дислокаційні конфігурації можуть змінюватися за механізмом переповзання, за яким може здійснюватися переміщення навіть сидячих дислокацій. Рух дислокацій буде множинним у різних площинах ковзання.

Розглянемо результати випробування на релаксацію напружень припою МВ у стані постачання при $t = 20^\circ\text{C}$ ($0,21 T_{пл}$), напруження початку релаксації становить $\sigma_0 = 158$ МПа, $\sigma_0 / \sigma_{0,1} = 1$.

Відповідний релаксаційний процес представлений на рис. 5, а. На початковій I стадії релаксаційний процес протікає інтенсивно. Однак, коли залишкове напруження становить 44% σ_0 , інтенсивність зниження напруження зменшується і через деякий час швидкість релаксації стає практично рівною нулю. Загальна глибина релаксації напружень становить 8%. На таку величину напруження релаксує за 80 с.

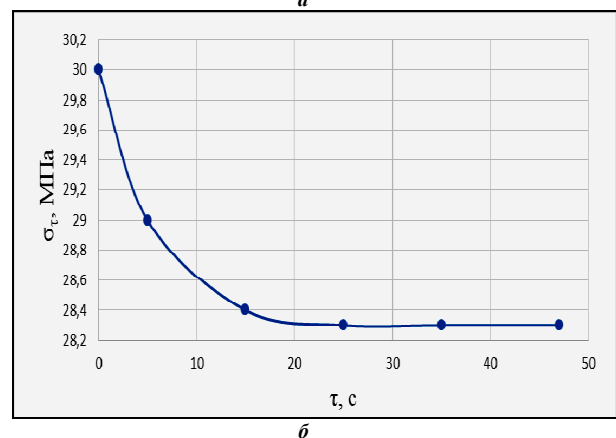
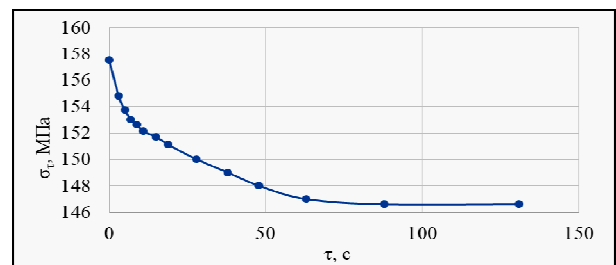


Рисунок 5 – Релаксація напружень у фользі припою МВ в різному стані, $t_{випр} = 20^\circ\text{C}$ ($0,21 T_{пл}$):

а – вихідний стан;

б – після відпалювання $t = 600^\circ\text{C}$, $\tau = 1,5$ год

При випробуванні у таких саме

температурних умовах припою МВ, відпаленого попередньо при $t = 600^\circ\text{C}$ для початкової напруженності $\sigma_0 = 30$ МПа, $\sigma_0 / \sigma_{0,1} = 1$ період інтенсивного знеміцнення значно коротший (рис. 5, б). Він становить 16 с, на відміну від вихідного зразка, для якого цей період 60 с.

Глибина релаксації за I період становить 4,5%. Загальна глибина релаксації становить 5% за проміжок часу 25 с. Причиною трохи більшого релаксаційного знеміцнення вихідного зразка слід, мабуть, вважати більш високу щільність активних дислокацій, здатних до ковзання, яка стала результатом прокатування.

У даних температурних умовах вихідний і відпалений зразки мають високу релаксаційну стійкість.

Розглянемо результати випробувань відпаленого зразка при $t = 200^\circ\text{C}$ ($0,34T_{\text{пл}}$), напруженні початку релаксації $\sigma_0 = 29,6$ МПа, $\sigma_0 / \sigma_{0,1} = 1,14$.

На початкових стадіях релаксація напружень відбувається дуже інтенсивно, потім швидкість релаксації зменшується і стає практично рівною нулю. За 40 с глибина релаксації становить 7,6%.

Результати випробувань відпаленого зразка при $t = 400^\circ\text{C}$ ($0,49T_{\text{пл}}$), початковому напруженні $\sigma_0 = 45$ МПа, $\sigma_0 / \sigma_{0,1} = 1$ наступні.

Крива релаксації в цьому випадку різко відрізняється від відповідних кривих при $t = 20^\circ\text{C}$ і $t = 200^\circ\text{C}$. Спостерігається досить тривалий період інтенсивного знеміцнення матеріалу. На I стадії релаксації напружень за 340 с глибина релаксації становить 54,5%. Потім, зменшуючись, швидкість релаксації стає практично рівною нулю. Загальна глибина релаксації становить 56% за час випробувань 380 с.

Релаксаційні процеси, що проходять в даному припої при $t = 600^\circ\text{C}$ ($0,64T_{\text{пл}}$) (рис. 6) при початковому напруженні $\sigma_0 = 21$ МПа, також характеризуються високою швидкістю знеміцнення. За перші 250 с досліджень глибина релаксації досягла 52,5% при загальній глибині релаксації 53% за 330 с. Потім швидкість релаксаційних процесів практично наближається до нуля.

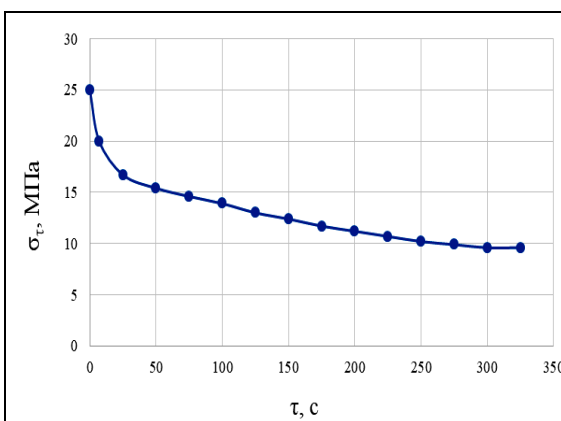


Рисунок 6 – Релаксація напружень у фользі припою відпаленого МВ, $\sigma_{0,1} = 19$ МПа, $t_{\text{випр}} = 600^\circ\text{C}$ ($0,64T_{\text{пл}}$)

Таким чином, якщо за 1–1,5 хв. релаксація напружень при $t = 20^\circ\text{C}$ і $t = 200^\circ\text{C}$ загасає, то при $t = 400^\circ\text{C}$ і $t = 600^\circ\text{C}$ навіть після 5 хв матеріал інтенсивно знеміцнюється.

Як видно з результатів диференційно оброблених кривих, які наведені на рис. 7, для кривих релаксації, знятих при близьких значеннях $\varepsilon = 1,2\%$, нахил кривих теж близький. Отже, можна припустити, що ця стадія релаксації обумовлена термоактиваційними процесами. Дійсно, при близьких ε дислокаційна структура буде характеризуватися значеннями ρ (щільність дислокацій) одного порядку ($\varepsilon = \rho b l$). Разом з тим, для диференціальних кривих, отриманих при 400°C і 600°C , чітко спостерігається II стадія, тобто відбувається різка зміна нахилу кривої (рис. 7). При $t = 400^\circ\text{C}$ ця стадія настає через 64 с після початку випробувань, а при $t = 600^\circ\text{C}$ – через 5 с.

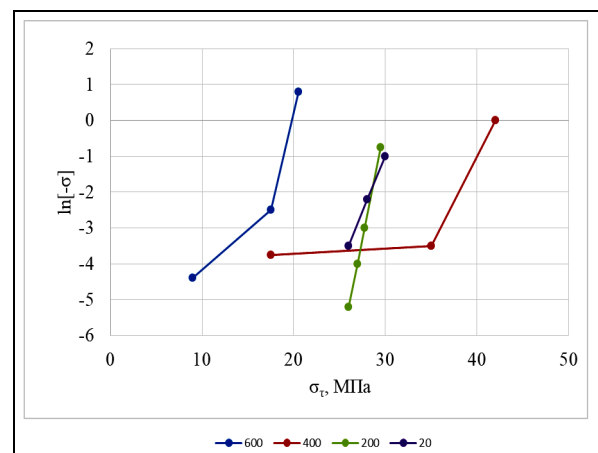


Рисунок 7 – Релаксація напружень в припої МВ після диференційної обробки

Поява II стадії на диференціальних кривих пов'язана з процесами знеміцнення в матеріалі (термоактиваційними і дифузійними), які йдуть паралельно. Запропоновані механізми релаксації на II стадії узгоджуються з теоретичними уявленнями.

Разом з тим, дотримуючись таких міркувань, інтенсивність зниження швидкості релаксації напружень залежно від напруження, яке залишилося, була б вище при $t = 400^\circ\text{C}$, а в даному випадку більш інтенсивне зниження швидкості релаксації спостерігається при $t = 600^\circ\text{C}$. З цього приводу можна зробити наступне припущення. Як видно з табл. 1, при $t = 400^\circ\text{C}$ спостерігається провал пластичності. Тоді більш інтенсивне зниження швидкості релаксації при $t = 400^\circ\text{C}$ обумовлено протіканням двох процесів – дифузійним переповзанням дислокацій і процесами руйнування.

Таким чином, кінетика релаксаційних процесів припою МВ при температурах 400°C , 600°C подібна і відбувається за термоактиваційним і дифузійним механізмами.

Висновки

1. За допомогою проведених металографічних досліджень мідної фольги марки

МВ визначена її структура в різному стані.

2. Показано, що при проведенні механічних досліджень в режимі активного розтягу у діапазоні температур, підвищення температури значною мірою призводить до знеміцнення припою.

3. Встановлено, що у твердого припою марки МВ спостерігається різке зниження пластичності при температурі 400°C.

4. Отримана інформація про релаксаційні властивості твердого припою марки МВ у вигляді фольги в робочому інтервалі температур.

5. Встановлено, що для мідного припою МВ характерна наявність двох механізмів релаксації напружень: термоактиваційний і дифузійний.

Список літератури

- Liu Y., Li J., Chen Zh. Et al. Effect of annealing temperature on microstructure and properties of stainless steel/copper composite strips. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. Vol. 9, (№ 103), 2026, p. 118-132. <https://doi.org/10.1007/s42114-026-01648-3>.
- Xie, X.; Lin, P.; Lian, B.; Xu, S.; Wang, Y.; Shi, S.; Fu, L.; Zhao, X. Microstructure and Mechanical Properties of In-Doped Low-Temperature SnPb Solders. *J. Materials*, 2025, 18, 886. <https://doi.org/10.3390/ma18040886>.
- Liu Y., K.N. Tu, Low melting point solders based on Sn, Bi, and In elements. *J. Materials Today Advances*. 2020, 8, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100115>.
- Xu, S.; Jing, X.; Zhu, P.; Jin, H.; Paik, K.-W.; He, P.; Zhang, S. Equilibrium phase diagram design and structural optimization of SAC/Sn-Pb composite structure solder joint for preferable stress distribution. *J. Materials Characterization*. 2023, 206, 113389. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113389>.
- Junior, R.R.R., Oliveira, D.L.R., Lopes, F.P.D., Simonassi, N.T., Vieira, C.M.F., Monteiro, S.N. (2024). Impact Evaluation of Corn Husk Reinforced Epoxy Composites. In: Wisner, B., Hunyadi Murph, S.E., Mastorakos, I.N., Paramsothy, M. (eds) *Composite Materials . TMS 2024. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50180-7_3.
- Pogribniy M. Rebrova O., Shevchenko S., Vasilchenko A. Improving the quality of heat treatment using microwave heating of products with a complex profile of hardened surfaces. *Solid state phenomena*. 2024. Vol. 364. pp. 39–45. <https://doi.org/10.4028/p-Kmy1av>.
- Гонтар Ю. Г. *Електротехнічні матеріали* [Електронний ресурс] : навч. посібник. Харків : НТУ "ХПІ", 2025. 503 с.
- Трегуб М. І., Рубець А. М., Хахула В. С. *Електротехнічні матеріали*: навчальний посібник. Біла Церква, 2020. 60 с.
- Василенко І. І., Василенко Ю. І., Широков В. В. *Конструкційні та електротехнічні матеріали*: навчальний посібник. Львів. 2021. 242 с.
- Паржицький О. В., Аушева С. В. *Електро матеріалознавство* : навч. посібн. для здобувач. проф. (проф.-тех.) освіти. Київ : Грамота, 2023. 224 с.
- Механічні випробування матеріалів* [Електронний ресурс] : навч.-метод. посіб. для виконання лабораторних робіт (Частина 1) / Антонова Г. В., Вершков О. О., Бондаренко Л. Ю. та ін. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 112 с.
- Конструкційні матеріали і технології [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Будяк Р. В., Посвятенко Е. К., Швець Л. В. та ін. Вінниця, 2020. 240 с.
- Прикладне матеріалознавство: підручник для вищих навчальних закладів III-IV ступенів акредитації* [Електронний ресурс] / Авт. колектив: Сушко О. В., Посвятенко Е. К., Кюрчев С. В. та ін. Мелітополь : ТПЦ «Forward press», 2019. 352 с.
- Матеріалознавство* [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Бузило В. І., Сердюк В. П., Яворський А. В. та ін. / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2021. 243 с.
- Прокопович І. В. *Металознавство* [Електронний ресурс] : навч. посіб. / І. В. Прокопович. Одеса : Екологія, 2020. 308 с.
- Афанасьєва О. В. *Функціональні матеріали оптоелектронної техніки. Частина друга* [Електронний ресурс]. Навч. посіб. / О. В. Афанасьєва. Харків : ХНУРЕ, 2019. 172 с.
- Тарасова Л. Д. *Матеріалознавство та конструкційні матеріали: Практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Медична інженерія»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 143 с.
- Сушко О. В., Колодій О. С. *Нові матеріали в машинобудуванні : навч.-метод. посіб. до виконання лабораторних робіт*. Мелітополь : ТПЦ «Forward press», 2021. 106 с.
- Долгов О. М., Колосов Д. Л. *Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів* [Електронний ресурс] : навч. посіб. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 70 с.

References (transliterated)

- Liu Y., Li J., Chen Zh. Et al. (2026). Effect of annealing temperature on microstructure and properties of stainless steel/copper composite strips. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. Vol. 9, (no. 103), pp. 118-132. <https://doi.org/10.1007/s42114-026-01648-3>.
- Xie, X.; Lin, P.; Lian, B.; Xu, S.; Wang, Y.; Shi, S.; Fu, L.; Zhao, X. (2025). Microstructure and Mechanical Properties of In-Doped Low-Temperature SnPb Solders. *J. Materials*, 18, 886. <https://doi.org/10.3390/ma18040886>.
- Liu Y., K.N. Tu, (2020). Low melting point solders based on Sn, Bi, and In elements. *J. Materials Today Advances*, 8, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100115>.
- Xu, S.; Jing, X.; Zhu, P.; Jin, H.; Paik, K.-W.; He, P.; Zhang, S. (2023). Equilibrium phase diagram design and structural optimization of SAC/Sn-Pb composite structure solder joint for preferable stress distribution. *J. Materials Characterization*, 206, 113389. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113389>.
- Junior, R.R.R., Oliveira, D.L.R., Lopes, F.P.D., Simonassi, N.T., Vieira, C.M.F., Monteiro, S.N. (2024). *Impact Evaluation of Corn Husk Reinforced Epoxy Composites*. In: Wisner, B., Hunyadi Murph, S.E., Mastorakos, I.N., Paramsothy, M. (eds) *Composite Materials . TMS 2024. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50180-7_3.
- Pogribniy M. Rebrova O., Shevchenko S., Vasilchenko A. (2024). Improving the quality of heat treatment using microwave heating of products with a complex profile of hardened surfaces / M. Pogribniy, O. *Solid state phenomena*. Vol. 364. pp. 39–45.

- <https://doi.org/10.4028/p-KmyIav>.
7. Hontar Yu. H. *Elektrotekhnichni materialy* [Elektronnyi resurs] : navch. posibnyk. Kharkiv : NTU "KhPI", 2025. 503 p.
 8. Trehub M. I., Rubets A. M., Khakhula V. S. *Elektrotekhnichni materialy: navchalnyi posibnyk*. Bila Tserkva, 2020. 60 p.
 9. Vasylenko I. I., Vasylenko Yu. I., Shyrokov V. V. *Konstruksiini ta elektrotekhnichni materialy: navchalnyi posibnyk*. Lviv. 2021. 242 p.
 10. Parzhytskyi O. V. *Elektromaterialoznavstvo : navch. posibn. dlia zdobuvach. prof. (prof.-tekh.) osvity* / O. V. Parzhnytskyi, S. V. Ausheva, H. Kyiv : Hramota, 2023. 224 p.
 11. *Mekhanichni vyprovuvannia materialiv* [Elektronnyi resurs] : navch.-metod. posib. dlia vykonannia laboratornykh robiv (Chastyna 1) / Antonova H. V., Vershkov O. O., Bondarenko L. Yu. ta in. Melitopol : TDATU, 2020. 112 p.
 12. Budiak R. V., Posviatenko E. K., Shvets L. V. ta in. *Konstruksiini materialy i tekhnologii* [Elektronnyi resurs] : navch. posib. Vinnytsia, 2020. 240 p.
 13. *Prykladne materialoznavstvo: pidruchnyk dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv III-IV stupeniv akredytatsii* [Elektronnyi resurs] / Avt. kolektyv: Sushko O. V., Posviatenko E. K., Kiurchev S. V. ta in. Melitopol : TPTs «Forward press», 2019. 352 p.
 14. *Materialoznavstvo* [Elektronnyi resurs] : navch. posib. / Buzlyo V. I., Serdiuk V. P., Yavorskyi A. V. ta in. / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. tekhn. un-t «Dniprovska politekhnika». Dnipro : NTU «DP», 2021. 243 p.
 15. Prokopovych I. V. *Metaloznavstvo* [Elektronnyi resurs] : navch. posib. / I. V. Prokopovych. Odesa : Ekolohiia, 2020. 308 p.
 16. Afanasieva O. V. *Funktionalni materialy optoelektronnoi tekhniky. Chastyna druha* [Elektronnyi resurs]. Navch. posib. / O. V. Afanasieva. Kharkiv : KhNURE, 2019. 172 p.
 17. Tarasova L. D. *Materialoznavstvo ta konstruksiini materialy* : Praktykum : navch. posib. dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra za osvithnimy prohrmamamy «Medychna inzheneriia» / L. D. Tarasova. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. 143 p.
 18. Sushko O. V., Kolodii O. S. *Novi materialy v mashynobuduvanni : navch.-metod. posib. do vykonannia laboratornykh robiv*, Melitopol : TPTs «Forward press», 2021. 106 p.
 19. Dolhov O. M. *Mekhanichni vlastyivosti ta konstruksiini mitsnist materialiv* [Elektronnyi resurs] : navch. posib. / O. M. Dolhov, D. L. Kolosov. Dnipro : NTU «Dniprovska politekhnika», 2022. 70 p.

*Надійшла (received) 24.03.2026
Стаття прийнята до друку 20.05.2026
Опублікована 29.05.2026*

Відомості про авторів /About the Authors

Протасенко Тетяна Олександрівна / Protasenko Tetiana – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри «Технологія металів та матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-7478>; e-mail: Tetiana.Protasenko@khpri.edu.ua

Реброва Олена Михайлівна / Rebrova Olena – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2315-7003>; e-mail: Olena.Rebrova@khpri.edu.ua

Свинаренко Максим Сергійович / Svinarenko Maksym – кандидат технічних наук, доцент, Харківська державна академія дизайну і мистецтв» доцент кафедри «Теплогазопостачання, вентиляції та використання теплових вторинних енергоресурсів», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9134-2759>; e-mail: svinarenko.maksym@ksada.org.

Ребров Олексій Юрійович / Rebrov Oleksii – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Автомобіле- і тракторобудування», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>; e-mail: Oleksii.Rebrov@khpri.edu.ua