

УДК 669.295:620.178.311.81

ПІДВИЩЕННЯ ОПІРНОСТІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ВТОМІ ТВЕРДОРОЗЧИННИМ ЗМІЦНЕННЯМ ПОВЕРХНІ

А. Пічугін

Ст. наук. співр., канд. техн. наук

О. Лук'яненко

Канд. техн. наук

В. Труш

Аспірант

Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
м. Львів

Досліджений вплив твердорозчинного зміцнення поверхневих шарів α -сплавів титану VT1-0 і VT5 та псевдо α -сплаву титану OT4-1 методом термодифузійного насичення з розрідженого газового середовища на їхні втомні характеристики за обертового згину. Показано, що залежність межі втоми від рівня поверхневого зміцнення має максимум, величина якого залежить від глибини зміцненої зони. Досягнуте 38 % підвищення вихідної межі втоми досліджених сплавів титану за рахунок регламентованого твердорозчинного зміцнення поверхневих шарів металу: для сплаву VT1-0 $\Delta\sigma_{-1} = 38\%$ за величини поверхневого зміцнення (відносного приросту поверхневої твердості $K = 70\%$ і глибини зміцненої зони $l = 30\ \mu\text{m}$); для сплаву VT5 $\Delta\sigma_{-1} = 25\%$ ($K = 60\%$, $l = 30\ \mu\text{m}$); для сплаву OT4-1 $\Delta\sigma_{-1} = 38\%$ ($K = 35\%$, $l = 45\ \mu\text{m}$). Запропонована методика вибору параметрів хімікотермічного оброблення для регламентованого поверхневого зміцнення α - та псевдо α -сплавів титану.

титановий сплав, твердорозчинне зміцнення, домішки проникнення, втомна міцність

Протягом усієї історії застосування титанових сплавів зростання їх виробництва й обсягів використання в різних конструкціях неодноразово переривалися різкими спадами. Причинами цього були наслідки невчасно усвідомлених особливостей титану, пов'язаних з його високою реакційною здатністю щодо кисню, азоту й вуглецю, насичення якими приводить до твердорозчинного зміцнення титанової матриці. Ці елементи проникнення, у незначних концентраціях, завжди містилися в титанових сплавах як небажані домішки. Тому найважливішим завданням металургії титану було зниження концентрації елементів проникнення у вихідному металі, що є запорукою технологічності (пластичність, здатність до деформування й т.п.)

напівфабрикатів з титанових сплавів. Сьогодні це завдання успішно розв'язане. Більше того, легування киснем (до 0,2 %) використовують у сучасних оцценолегованих сплавах титану [1]. У той же час, твердорозчинне зміцнення титанових сплавів відбувається в результаті газонасичення (киснем, азотом) під час технологічних або експлуатаційних нагрівів, термічного або хімікотермічного оброблень. У цьому випадку в металі формується поверхневий газонасичений шар (ГШ) певної глибини з градієнтом концентрації домішки проникнення. Такому шару властиві підвищена твердість — тому його називають зміцненим шаром. У цьому випадку маємо справу з так званим поверхневим твердорозчинним зміцненням

титанових сплавів. Освоєння нових технологій виготовлення й оброблення виробів з широкої гами титанових сплавів (вакуумний відпал, зварювання тощо) неминуче зіштовхувалося з проблемою газонасичення, захисту від нього й прогнозування впливу газонасичення на їхні експлуатаційні властивості. В останні роки зацікавленість цією тематикою знову збільшується, що пов'язано зі зростанням вимог до конструкційних матеріалів, вичерпанням традиційних і пошуком нових методів підвищення експлуатаційних властивостей виробів.

На практиці існує два підходи до оцінювання наслідків поверхневого твердорозчинного зміцнення титанових сплавів. Перший — позитивний. Він ґрунтується на використанні твердорозчинного зміцнення поверхневих шарів металу для підвищення опору зношуванню, антикорозійних властивостей у розчинах кисневмісних кислот, запобігання схоплювання деталей кріплення тощо. У цьому випадку вироби з титанових сплавів піддають хімікотермічному обробленню: оксидуванню повітряному або у розрідженому газовому середовищі, різним видам азотування тощо, у процесі якої формують ГШ певної глибини й градієнта твердості.

Другий підхід — негативний. Він пов'язаний із загальноприйнятою думкою, що газонасичення (твердорозчинне зміцнення) поверхневих шарів металу знижує його механічні властивості: окрихчує, знижує здатність до деформування, полегшує зародження втомних тріщин і знижує опір втомі. Тому в процесі термічного оброблення, зварювання, технологічних нагрівів потрібно зводити до мінімуму газонасичення металу, а утворені ГШ на готових виробах видаляти різними методами: хімічним травленням, піскоструминним або механічним обробленням. У практику введений критерій оцінювання допустимого поверхневого зміцнення за газонасичення. Він визначається як відносний приріст поверхневої твердості $K = ((H_{\mu}^s - H_{\mu}^c) / H_{\mu}^c) \cdot 100\%$, де H_{μ}^s — твердість поверхні металу; H_{μ}^c — твердість його серцевини. Згідно з існуючими нормативами потрібно видаляти ГШ, твердість яких більше, ніж на 25 % перевищує твердість серцевини [2].

Вплив ГШ з однаковими параметрами на механічні властивості титанових сплавів різних структурних класів зовсім неоднаковий. У праці [3] переконливо показано, що чутливість механічних властивостей титанових сплавів до присутності ГШ залежить від фазово-структурного стану металу. Автори іншої праці [4] відзначають, що ефект від регламентованого зняття ГШ доцільно застосовувати до титанових сплавів малої і середньої міцності, тобто, величина ефекту залежить не тільки від фазово-структурного стану металу, але й від рівня його міцності або запасу пластичності.

Можна зробити висновок, що наведений вище універсальний критерій оцінювання допустимого поверхневого зміцнення в результаті газонасичення не враховує особливостей впливу фазово-структурного стану металу як на процес твердорозчинного зміцнення, так і на чутливість металу до присутності ГШ, а значення критерію K має потребу в коригуванні з урахуванням фазово-структурного стану металу, вихідного рівня міцності, відносної товщини зміцненого шару тощо [1, 2].

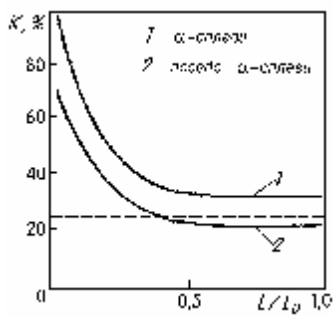
Менш відомі експериментальні дані, що свідчать про сприятливий вплив газонасичення на механічні властивості титанових сплавів. У низці праць показано, що залишкові ГШ, отримані в результаті неповного їхнього видалення, сприяють підвищенню втомної довговічності зразків зі сплавів ВТ1-0, ВТ6, ВТ14 і ОТ4-1 під час випробувань на повторно-статичний розтяг і малоцикловий чистий згин, порівняно зі зразками з повністю видаленим ГШ [3, 5 — 6]. У такий спосіб ефект позитивного впливу залишкових ГШ, отриманих за рахунок регламентованого зміцнення, є визнаним. На жаль, у жодній з відомих праць мова не йде про комплекс параметрів цих шарів (їхня глибина — абсолютна й відносна, градієнт твердості за глибиною зміцненого шару, поверхнева твердість та її приріст). Адже використання таких чинників керування інтенсивністю газонасичення, як температурно-часові й газодинамічні параметри газового середовища, фазово-структурний стан і текстура деформації металу, нестаціонарність умов насичення, напружений стан і т. п. дає можливість отримувати ГШ з різним співвідношенням цих параметрів [7].

Аналіз експериментальних даних наводить на думку, що варто ввести два критерії для оцінювання параметрів ГШ на титанових сплавах з погляду забезпечення працездатності виробів. Перший, $K_{\text{доп}}$ — допустимий рівень твердорозчинного зміцнення за газонасичення, перевищення якого знижує працездатність виробів з титанових сплавів з ГШ. Другий, $K_{\text{опт}}$ — оптимальний рівень твердорозчинного зміцнення за газонасичення, забезпечує досягнення максимальних втомних властивостей металу.

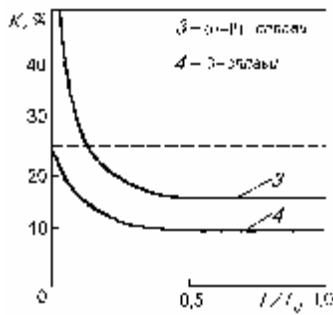
Допустимий рівень твердорозчинного зміцнення поверхневих шарів металу. У праці [3] на підставі оброблення масиву експериментальних даних запропонований новий критерій оцінювання експлуатаційної придатності виробів з титанових сплавів з ГШ: $K_{\text{доп}}$ — допускний рівень поверхневого зміцнення титанових сплавів за газонасичення — диференційований за структурним класом титанових сплавів і функціонально залежний від відносної глибини газонасиченої (зміцненої) зони (l/l_0) (рис. 1).

Криві 1 — 4 на рис. 1 відокремлюють зону допустимих значень параметрів ГШ, зону безпечної експлуатації виробів з ГШ (поле значень нижче відповідної кривої), від «небезпечної» зони — вироби з такими параметрами ГШ непридатні до експлуатації. Рекомендовано використовувати наведені залежності для тонколистових (1 — 3 мм) напівфабрикатів або виробів. Однак з певним наближенням запропонований підхід можна використати й для напівфабрикатів і виробів більшої товщини. Для ГШ більшої глибини ($l/l_0 > 0,5$) рекомендовано використовувати фіксовані значення коефіцієнта $K_{\text{доп}}$: для α -сплавів $K_{\text{доп}} \leq 25\%$; для псевдо β -сплавів $K_{\text{доп}} \leq 20\%$; для $(\alpha+\beta)$ -сплавів $K_{\text{доп}} \leq 17\%$; для β -сплавів $K_{\text{доп}} \leq 10\%$.

Запропонований підхід дає змогу розширити діапазон допускних значень абсолютного приросту поверхневої твердості сплавів ВТ1-0 та ОТ4-1, особливо за малих глибин газонасиченої зони. Наприклад, при $l/l_0 = 0,1$ допустимий приріст $K_{\text{доп}}$ сплаву ВТ1-0 може становити 70 %, при $l/l_0 = 0,3$; $K_{\text{доп}} = 40$ %, при $l/l_0 = 0,5$; $K_{\text{доп}} = 30...35$ %, що істотно збільшує кількість виробів, придатних до



а)



б)

Рис. 1. Залежність допустимого рівня K_0 поверхневого зміцнення за газонасичення титанових сплавів різних структурних класів від відносної глибини l/l_0 ГШ (l — глибина газонасиченої зони; l_0 — половина товщини металу)

експлуатації без додаткового поверхневого оброблення. Допускні значення K_0 високоміцних сплавів BT23 і BT35 за більшого відношення l/l_0 набагато менші загальноприйнятого 25 % критерію. Крім цього, запропонований підхід дає можливість визначити глибину зняття металу, для відновлення експлуатаційних властивостей виробів з ГШ зі значною поверхневою твердістю.

Оптимальний рівень твердорозчинного зміцнення поверхневих шарів металу. У тій же праці [3] зроблений висновок, що за певної глибини газонасиченої зони завжди існує діапазон значень K_0 , за яких втомні характеристики металу із ГШ перевищують такі у вихідному стані. Цей діапазон зменшується з ростом глибини газонасиченої зони (відносної глибини газонасиченої зони l/l_0). Так, для сплаву BT1-0 (товщина зразка 1 мм) при $l=20$ мкм, $0 < K_0 < 100$ %; а при $l = 80$ мкм, $0 < K_0 < 55$ %. Однак з послідовним переходом від сплаву BT1-0 до сплавів OT4-1; BT23; BT35 діапазон значень K_0 звужується й зменшується приріст втомної довговічності. Для сплаву BT35, при $l=200$ мкм (тобто 20 % від товщини зразка), $0 < K_0 < 10$ %, а приріст довговічності практично відсутній. Тобто, з переходом від α - до $(\alpha+\beta)$ - і β - сплавів зростає їх чутливість до наявності газонасиченого поверхневого шару за втомних навантажень. Звідси виникає нове завдання: визначення оптимального рівня K_{opt} поверхневого твердорозчинного зміцнення титанових сплавів

регламентованим газонасиченням з урахуванням таких факторів як фазово-структурний стан металу, рівень міцності, товщина напівфабрикатів. Однак систематичні роботи з визначення K_{opt} титанових сплавів для підвищення їх втомних властивостей практично відсутні. Саме тому у цій статті досліджений вплив твердорозчинного поверхневого зміцнення термодифузійним насиченням з розрідженого газового середовища (вакууму) на втомні властивості титанових сплавів BT1-0, BT5 і OT4-1 за обертового згину для визначення оптимальних параметрів зміцнення.

Матеріали і методика дослідження. Об'єктом досліджень обрані α -сплави BT1-0 (технічно чистий титан), BT5 (Ti 5 Al) і псевдо-сплав OT4-1 (Ti-2,0Al-1,5Mn). Для визначення параметрів твердорозчинного зміцнення (коефіцієнта зміцнення K і глибини зміцненої зони l) поверхневих шарів виготовляли зразки-свідки у вигляді шайб діаметром 10 мм і товщиною 3 мм. Для втомних випробувань на обертовий згин обраний циліндричний зразок за стандартом DIN 50113 (рис. 2). Робочі поверхні зразків шліфували й полірували до шорсткості Ra 1,5.

Після виготовлення зразки відпалювали у вакуумі за режимом: $T = 800$ С, $t = 2$ h, $P = 0,05$ МПа, $I_{in} = 0,1$ МПа·дм³·с⁻¹ — для формування вихідного фазово-структурного стану (зняття залишкових напружень, видалення водню, гомогенізації й стабілізації структури). У вихідному стані міцність і пластичність досліджених сплавів становили: BT1-0 — $\sigma = 450$ МПа, $\delta = 27$ %; BT5 — $\sigma = 895$ МПа, $\delta = 20$ %; OT4-1 — $\sigma = 655$ МПа, $\delta = 21,5$ %.

Для вивчення впливу рівня й глибини поверхневого зміцнення й визначення оптимального співвідношення цих параметрів у поверхневих шарах металу методом термодифузійного насичення з розрідженого газового середовища формували: а) зміцнені шари однакової глибини з різним рівнем поверхневого зміцнення ($K = \text{var.}$, $l = \text{const}$); б) зміцнені шари різної глибини з однаковим рівнем поверхневого зміцнення ($K = \text{const}$, $l = \text{var.}$). Вибір режимів ХТО здійснювали за створеною авторами даної роботи методикою, заснованою на встановлених кореляціях між параметрами насичуючого середовища (температурно-часовими й газодинамічними) і характеристиками зміцнених шарів. Методика подана графічно у вигляді номограм для кожного з досліджених сплавів і конкретного температурного діапазону (рис. 3).

Алгоритм вибору режимів ХТО наступний. Використовуючи залежність глибини зміцненої зони від тривалості насичення для заданого розрідження (пунктирні криві 1, 2, 3) — права вісь номограми — визначаємо час

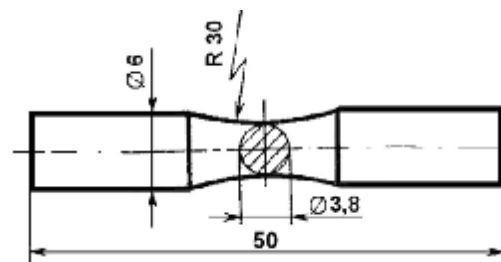


Рис. 2. Форма й розміри зразка для втомних випробувань

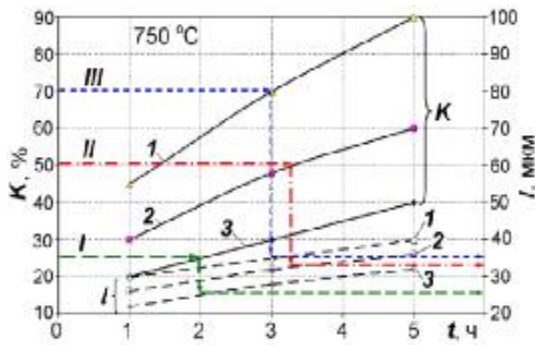


Рис. 3. Приклад вибору режимів термодифузійного насичення титанового сплаву VT1-0 за параметрами зміцненого шару — $l=30$ мкм: $K=25\%$ (I), $K=50\%$ (II), $K=70\%$ (III): 1 — $P=66$ МПа; 2 — $P=13,3$ МПа; 3 — $P=6,6$ МПа

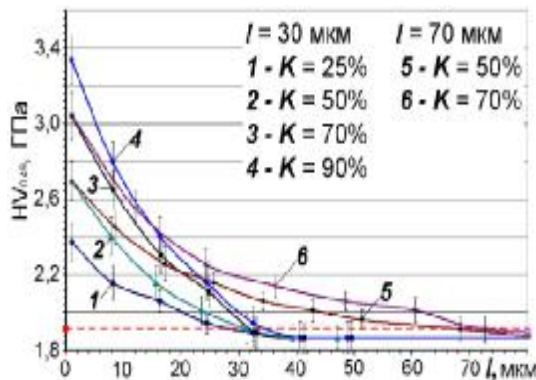


Рис. 4. Розподіл твердості по перетину зміцненого шару сплаву VT1-0 після термодифузійного насичення за різними режимами: 1 — 750 °C, 2 год, 66 МПа; 2 — 750 °C, 3 год, 13 МПа; 3 — 750 °C, 3 год, 66 МПа; 4 — 750 °C, 3 год, 66 МПа; 5 — 750 °C, 8 год, 3.9 МПа; 6 — 750 °C, 8 год, 3.9 МПа; $l_{in}=0,1$ — $0,16$ МПа·дм³·с⁻¹

t за який можна отримати зміцнений шар глибиною $l = 30$ – 35 мкм за різних розріджень P (ламані криві I, II, III). Переходячи до залежності рівня поверхневого зміцнення K від тривалості насичення за даного тиску середовища (суцільні криві 1, 2, 3) — ліва вісь номограми, визначаємо рівень поверхневого зміцнення, який можна отримати для заданих параметрів P і t . Так, для сплаву VT1-0 (рис. 3) заданий рівень поверхневого зміцнення $K = 70\%$ можна досягти лише при $P=66$ МПа. У такий спосіб параметри режиму термодифузійного насичення становитимуть: $T=750$ °C, $t = 3$ год, $P = 66$ МПа.

За рахунок зміни чотирьох параметрів термодифузійного насичення: парціального тиску кисню — P_{O_2} , температури — T , тривалості насичення — t і швидкості натікання кисню в реакційну камеру — I_{in} , на зразках титанових сплаву VT1-0 отримані зміцнені шари із заданим співвідношеннями K і l (рис. 4).

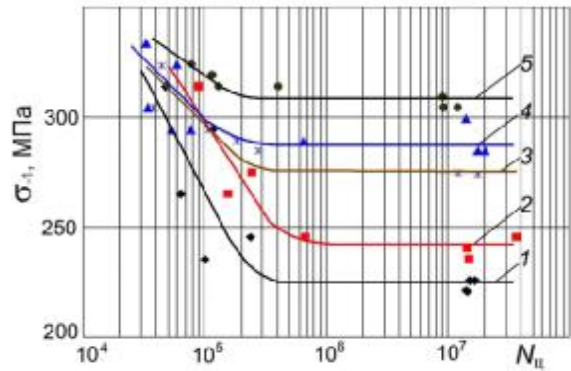
Аналогічний підхід для вибору режимів термодифузійного насичення був використаний при формуванні зміцнених шарів на титанових сплавах VT5 і OT4-1.

Втомні випробування на обертовий згин виконували в лабораторних умовах з частотою навантаження 46 Гц.

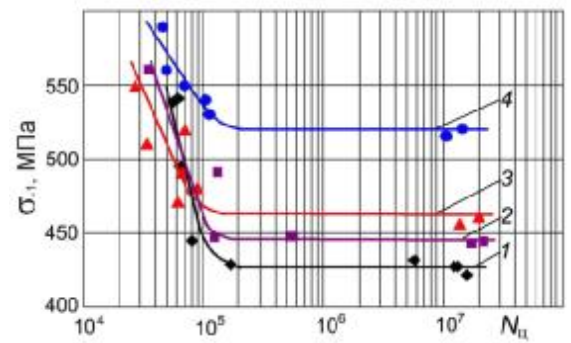
Використовували по 11 зразків на кожний рівень поверхневого зміцнення. Базу для визначення межі втоми приймали рівною $1,5 \times 10^7$ циклів.

Результати дослідження та їх обговорення. Регламентоване твердорозчинне поверхневе зміцнення термодифузійним насиченням з газового середовища, практично не змінюючи міцність і пластичність досліджених сплавів титану, істотно впливає на їхній опір втоми за випробувань на обертовий згин (рис. 5, табл. 1).

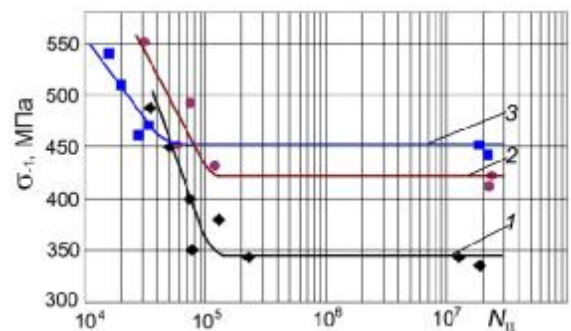
Отримані результати дають змогу проаналізувати вплив рівня поверхневого зміцнення й глибини зміцненої зони на опір втоми металу.



а)



б)



в)

Рис. 5. Криві втоми (обертовий згин) титанових сплавів VT1-0 (а), VT5 (б) і OT4-1 (в) після поверхневого зміцнення: а) 1 — вихідний стан $K=5\%$; $l=5$ мкм; 2 — 25%; 30 мкм; 3 — 90%; 30 мкм; 4 — 50%; 30 мкм; 5 — 70%; 30 мкм; б) 1 — вихідний стан $K=5\%$; $l=5$ мкм; 2 — 60%; 65 мкм; 3 — 35%; 65 мкм; 4 — 60%; 30 мкм; в) 1 — вихідний стан $K=5\%$; $l=10$ мкм; 2 — 35%; 70 мкм; 3 — 35%; 45 мкм

Зі збільшенням рівня поверхневого зміцнення K з 5 % до 80–90 %, за сталої глибини зміцненої зони ($l=30$ мкм), межа втоми σ_{-1} титанових сплавів BT1-0 і BT5 спочатку зростає, а потім знижується, тобто має максимум (рис. б).

Аналогічна тенденція спостерігається й для сплаву OT4-1. Найбільший відносний приріст межі втоми $\Delta\sigma_{-1}$ для сплаву BT1-0 досягає 38 % при $K=70$ %. Для сплаву BT5 $\Delta\sigma_{-1}=24$ % при $K=60$ %, $l=30$ мкм. Для сплаву OT4-1 $\Delta\sigma_{-1}=38$ % при $K=35$ %, $l=45$ мкм.

Такий характер зміни σ_{-1} можна пояснити тим, що розчинення кисню в металі з утворенням твердого розчину проникнення супроводжується виникненням стискальних напружень, які збільшують час до зародження втомних тріщин і поліпшують втомні властивості. З іншого боку, у результаті твердорозчинного зміцнення через розчинення кисню метал окрихчується. За певних умов може переважати той або інший фактор.

Дійсно, рентгеноструктурними дослідженнями зразків сплаву BT1-0 зафіксовані напруження I-го роду, які виникають у приповерхневих шарах металу внаслідок термодифузійного насичення. Однак ці напруження змінюються в межах десятків — сотень МПа. Причому, якщо у вихідному стані в об'ємі металу існують напруження розтягу до 10 МПа, то твердорозчинне зміцнення титану приводить до виникнення напружень стиску до 200 — 225 МПа.

Характерно, що найбільші напруження стиску й найбільша деформація кристалічної ґратки титану, що проявляється в зміні співвідношення її параметрів c/a , зафіксовані в зразках з рівнем поверхневого зміцнення

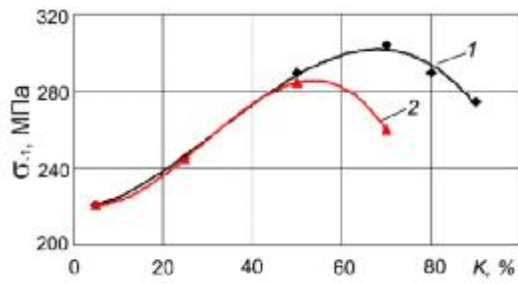
$K = 70$ % ($l = 30$ мкм). У цьому ж випадку рентгеноструктурний аналіз фіксує максимальне здрібнювання субзеренної структури металу. Дійсно, згідно з літературними даними, твердорозчинне зміцнення впливає на субструктуру, що формується під час термодифузійного насичення. Зокрема, ріст твердорозчинного зміцнення затримує перебудову дислокаційної структури й, відповідно, затримує субструктурні зміни [8]. Це нашоує на думку, що залежність параметрів субструктури (розмір субзерен) від рівня твердорозчинного зміцнення повинна мати максимум. Тобто повинен існувати оптимальний для формування субструктури з мінімальними розмірами складових рівень твердорозчинного зміцнення. Відомо, що субструктурі з найменшими параметрами властивий найбільший опір циклічним навантаженням [9]. Саме такі результати отримані нами в ході зіставлення даних рентгеноструктурних досліджень з результатами випробувань зразків титанового сплаву BT1-0 зі зміцненими, у результаті термодифузійного насичення киснем, поверхневими шарами. Максимальний приріст межі втоми $\Delta\sigma_{-1} = 38$ % отриманий після твердорозчинного поверхневого зміцнення з рівнем $K=70$ % ($l=30$ мкм), тоді як з подальшим ростом рівня поверхневого зміцнення до 90 % межа втоми знижується. Можна припустити, що саме такий рівень поверхневого зміцнення, у результаті термодифузійного насичення з розрідженого газового середовища, сприяє найбільшому здрібнюванню кристалітів зерна й розвитку оптимальної, з огляду на опір втомі, дислокаційної структури.

Таблиця 1

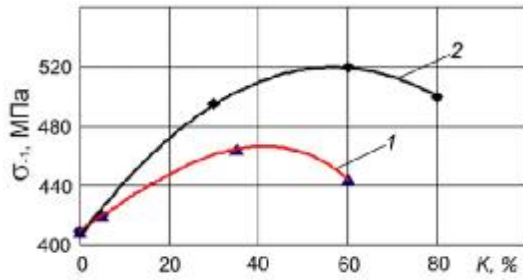
Межа втоми титанових сплавів BT1-0, BT5 і OT4-1 залежно від рівня поверхневого зміцнення і глибини зміцненої зони

Сплав	Твердість серцевини H_0 , МПа	Твердість поверхні H_s , МПа	Середній відносний приріст твердості поверхні K , %	Глибина зміцненої зони l , мкм	Межа втоми σ_{-1} , МПа	Відносний приріст межі втоми $\Delta\sigma_{-1}$, %
BT1-0	1800*	1900*	5*	5*	225*	0*
		2250	25		245	9,0
		2700	50	30	295	31,0
	1800	3050	70		310	37,5
		3420	90		275	22,0
		2700	50	70	285	28,5
		3050	70		260	15,5
BT5	3050*	3200*	5*	5*	420*	0*
		4030	30		495	18,0
		4480	60	30	520	24,0
	3050	5550	80		500	19,0
		3630	20	50	505	20,0
		4080	35		465	11,0
OT4-1	2650*	2780*	5*	10*	330*	0*
		2915	10	20	340	3,0
	2650	3050	20		420	28,0
		3580	35	45	455	38,0
		3580	35	70	425	29,0

* — значення прийняті за вихідний стан.



а)



б)

Рис. 6. Залежність межі втоми титанових сплавів ВТ1-0 (а) і ВТ5 (б) від рівня поверхневого зміцнення за сталої глибини зміцненої зони: а – $l = 30$ мкм; б – 1 – $l = 30$ мкм; 2 – $l = 65$ мкм

Збільшення глибини зміцненої зони l при сталому рівні поверхневого зміцнення K зменшує відносний приріст межі втоми (див. табл. 1, рис. 6).

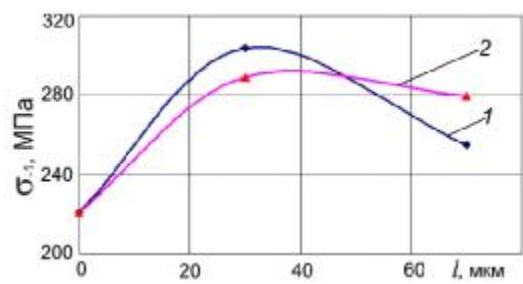
Характерно, що при більш високому рівні K зниження величини σ_1 з ростом глибини зміцненої зони відбувається стрімкіше (рис. 7).

Таким чином, можна зробити висновок, що для кожного рівня поверхневого зміцнення K α - і псевдо α -титанових сплавів ВТ1-0, ВТ5 і ОТ4-1 за термодифузійного насичення з контрольованого газового середовища існує оптимальна глибина l зміцненої внаслідок газонасичення зони, що забезпечує найвищий рівень втомних характеристик, і навпаки.

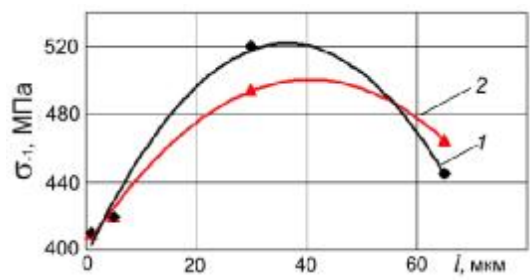
Слід зазначити, що оптимальний рівень поверхневого твердорозчинного зміцнення титанових сплавів залежить від їхнього вихідного рівня міцності (твердості серцевини металу) і фазового складу. Так зі збільшенням вихідної міцності в ряді ВТ1-0 \rightarrow ВТ5 оптимальний рівень поверхневого зміцнення K_{opt} ($l = 30$ мкм) знижується, відповідно, з 70 до 60 %. При цьому відносний приріст межі втоми σ_1 також знижується з 37,5 % (ВТ1-0) до 24 % (ВТ5). Ще істотніше впливає на величину K_{opt} фазовий склад сплаву.

За порівнянної вихідної міцності K_{opt} ($l = 45$ мкм) для псевдо α - сплаву ОТ4-1 становить 35–40 % (див. табл. 1). Це зайвий раз підтверджує теза, що зі збільшенням кількості β -фази в титанових сплавах чутливість їхніх механічних властивостей, особливо втомних, до присутності газонасичених шарів істотно зростає.

За фрактографічними дослідженнями (рис. 8) максимальний рівень втомної міцності при зміцненні на $K=70$ % обумовлений здрібнюванням структури, що й підтверджується морфологією зламу.



а)



б)

Рис. 7. Залежність межі втоми титанового сплаву ВТ1-0 (а) і ВТ5 (б) від глибини зміцненої зони при постійному рівні поверхневого зміцнення: а – 1 – $K = 50$ %; 2 – $K = 70$ %; б – 1 – $K = 30$ %; 2 – $K = 60$ %.

У цьому випадку механізм поширення мікротріщин носить в'язкий трансзеренний характер. У зламі фіксуються області ямкового характеру, деформаційні гребені, а також елементи борознистого рельєфу, характерного для класичного в'язкого втомного руйнування.

Зміцнення на $K = 90$ % обумовлює крихкий характер зародження мікротріщин транскристалітного й міжзеренного характеру, розмір яких може досягати розмірів сумірних з товщиною зміцненого шару, що й знижує межу втоми порівняно зі зміцненням на 70 %.

У такий спосіб можна констатувати, що максимальний рівень втомної довговічності, за оптимального рівня твердорозчинного зміцнення, обумовлений одночасною дією взаємодоповнюючих факторів. Вихід за межі такого рівня зміцнення призводить до порушення цього оптимуму: вичерпанню запасу мікропластичності (метал окрихчується), недостатнім проробленням субзеренної структури й т. п.

Висновки. Встановлено, що твердорозчинне поверхневе зміцнення α - і псевдо α -сплавів титану ВТ1-0, ВТ5 і ОТ4-1 за термодифузійного насичення домішками проникнення з контрольованого газового середовища приводить до підвищення межі втоми за певного співвідношення параметрів зміцнених шарів K (рівня поверхневого зміцнення) і l (глибини зміцненої зони). Характер залежності межі втоми (σ_1) досліджених сплавів від K має максимум, величина якого залежить від l . Тобто, існує оптимальне співвідношення параметрів K_{opt} і l_{opt} . Зі збільшенням l , за сталою K , позитивний вплив поверхневого зміцнення на втомні характеристики знижується. Порівняно з вихідним станом, найбільший відносний

Література

1. Александров А.В., Прудковский Б.А. Разные грани титана и его сплавов (продолжение) // Титан. – 2004. – №1(14). – С. 74–79.
2. Вакуумный отжиг титановых конструкций / Б.А. Колачев, В.В. Садков, В.Д. Талалаев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
3. Оцінка експлуатаційної придатності виробів з титанових сплавів різних структурних класів з газонасиченими шарами / В. М. Федірко, А. Т. Пічугін, О. Г. Лук'яненко, З. О. Сірик // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1996. – т. 32, № 6. – С. 49–54.
4. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
5. Влияние режимов отжига на циклическую кратковременную прочность листов титана и сплава ОТ4-1 / А. Б. Коломенский, И. И. Муравьев, Б. А. Колачев и др. // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – № 4 – С. 120–122.
6. О влиянии глубины съема газонасыщенного слоя на повторно-статическую долговечность и пластичность титановых сплавов ОТ4 и ВТ6ч / А.Б. Коломенский, Б.А. Колачев, А.В. Дегтярев, А.Н. Рошупкин // Физ.-хим. механика материалов. – 1991. – № 3. – С.25–28.
7. Федирко В.Н., Погрелюк И.Н., Пичугин А.Т. Инженерия поверхности титановых сплавов в контролируемых кислород-азотосодержащих средах // Титан. – 2004. – № 2(15). – С. 50–58.
8. Конева Н.А. Классификация, эволюция и самоорганизация дислокационных структур в металлах и сплавах // Соросовский Образовательный журнал. – 1996. – № 6. – С. 99–107.
9. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. – 408 с.

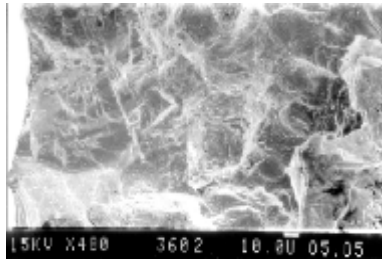
Отримана 28.04.09

A. Pichuhin, O. Luk'yanenko, V. Trush

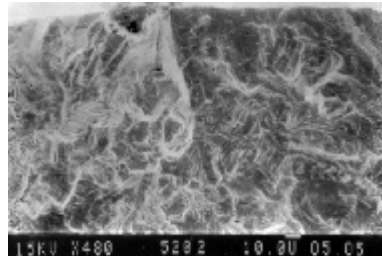
Increase of fatigue resistance of titanium alloys through the solid solution hardening of surface

G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

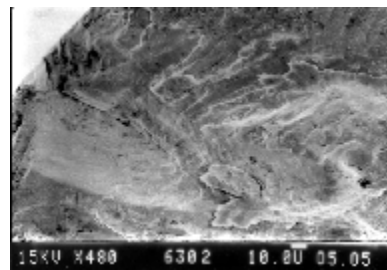
The influence of interstitial solid solution hardening of surface layers of VT1-0 and VT5 α -titanium alloys and of OT4-1 pseudo α -titanium alloy by a method of thermal diffusion saturation from a rarefied gas environment, on their fatigue characteristics is examined at a rotating beam fatigue test. It is displayed, that dependence of fatigue value on surface strengthening level has a maximum which magnitude depends on depth of the hardened band. 38 % raise of initial fatigue value of examined titanium alloys at the expense of regulated interstitial solid solution hardening of surface layers of metal are attained: for alloy VT1-0 $Ds_{\cdot} = 38\%$ at magnitude of surface strengthening (the relative incremental value of surface hardness $K=70\%$ and depth of the hardened band $l = 30\ \mu\text{m}$); for alloy VT5 – $Ds_{\cdot} = 25\%$ ($K=60\%$, $l = 30\ \mu\text{m}$); for alloy OT4-1 – $Ds_{\cdot} = 38\%$ ($K=35\%$, $l = 45\ \mu\text{m}$). The procedure of sampling of parameters of chemical-thermal treatment for the regulated surface strengthening α - and pseudo α -titanium alloy is offered.



а)



б)



в)

Рис. 8. Мікрофрактограми приповерхневої частини зломів (вогнище зародження тріщини) зразків титанового сплаву ВТ1-0 з різним рівнем поверхневого зміцнення: а – $K=50\%$, $l=30\ \mu\text{м}$, $\Delta\sigma_{\cdot} = 285\ \text{МПа}$; б – $K=70\%$, $l=30\ \mu\text{м}$, $\sigma_{\cdot} = 310\ \text{МПа}$; в – $K=90\%$, $l=30\ \mu\text{м}$, $\Delta\sigma_{\cdot} = 275\ \text{МПа}$

приріст межі втоми ($\Delta\sigma_{\cdot}$) серед зразків з поверхневим шаром, дифузійно зміцненим домішками проникнення, відзначено для низько- й середньоміцних сплавів ВТ1-0 і ОТ4-1. Так, для сплаву ВТ1-0 $\Delta\sigma_{\cdot} = 38\%$ за відносного приросту поверхневої твердості $K = 70\%$ і $l \leq 30\ \mu\text{м}$; для сплаву ОТ4-1 $\Delta\sigma_{\cdot} = 38\%$ ($K=35\%$, $l=45\ \mu\text{м}$). Зі збільшенням вихідної міцності позитивний ефект від твердорозчинного зміцнення знижується: для більш міцного сплаву ВТ5 – $\Delta\sigma_{\cdot} = 25\%$ ($K=60\%$, $l=30\ \mu\text{м}$). Зі збільшенням кількості β -фази у титанових сплавах чутливість їхніх механічних властивостей, особливо втомних, до присутності газонасичених шарів істотно зростає, що проявляється в зниженні значень $K_{\text{омп}}$, за яких досягається максимальний приріст межі втоми. Згідно з мікрофрактографічним аналізом руйнування зміцненого на $K_{\text{омп}}$ шару відбувається, переважно, за в'язким ямковим механізмом.