

**МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ЗАДАНОГО РІВНЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ****В. С. Труш, В. М. Федірко, О. Г. Лук'яненко**

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

вул. Наукова, 5, м. Львів, Україна, 79060. E-mail: trushvasyl@gmail.com.

Показано, що ефект підвищення втомної міцності і довговічності виробів з  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану, які працюють за циклічних навантажень можливий за певного співвідношення параметрів зміцнених шарів. Наведено оптимальне співвідношення параметрів зміцнених шарів (рівень зміцнення поверхні та розмір зміцненого шару), які забезпечують максимальне підвищення ресурсних характеристик. Показано спосіб формування зміцнених шарів на титані. Запропоновано отримувати зміцнені поверхневі шари на титанових сплавах шляхом термодифузійного насичення (твердорозчинне зміцнення) елементам проникнення з розрідженого контрольованого кисневмісного газового середовища. Показано переваги такого способу. Зокрема, відмічено, що для термодифузійного насичення характерно відтворюваність процесу, обмежена кількість технологічних параметрів, які необхідно контролювати в процесі обробки, можливість обробляти деталі довільної форми, в тому числі з отворами, висока адгезія модифікованих шарів з матрицею. Для практичного застосування запропоновано підходу розроблено методику вибору параметрів регламентованого твердорозчинного зміцнення поверхневого шару титанових сплавів, яка складається: з методики визначення оптимального рівня твердорозчинного зміцнення поверхні  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титана залежно від прогнозованої глибини зміцненої зони; з методики визначення оптимальних температурно-часових і визначення газодинамічних параметрів термодифузійного насичення виробів з  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів з розрідженого контрольованого кисневмісного газового середовища для досягнення оптимального рівня поверхневого зміцнення.

**Ключові слова:** титанові сплави, термодифузійне насичення, поверхневий шар, рівень зміцнення.

**МЕТОДИКА ВИБОРА ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДИФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ****В. С. Труш, В. Н. Федирко, А. Г. Лукьяненко**

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины

ул. Научная, 5, г. Львов, Украина, 79060. E-mail: trushvasyl@gmail.com.

Показано, что эффект повышения усталостной прочности и долговечности изделий из  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов титана, которые работают при циклических нагрузках, возможен при определенном соотношении параметров усиленных слоев. Приведены оптимальные соотношения параметров упрочненных слоев (уровень упрочнения поверхности и размер упрочненного слоя), которые обеспечивают максимальное повышение ресурсных характеристик. Показан способ формирования упрочненных слоев на титане. Предложено формировать упрочненные поверхностные слои на титановых сплавах путем термодиффузионного насыщения (твердорастворимого упрочнения) примесью внедрения с разреженной контролируемой кислородсодержащей газовой среды. Приведены преимущества такого способа. В частности, отмечено, что для термодиффузионного насыщения характерно воспроизводимость процесса, ограниченное количество технологических параметров, которые необходимо контролировать в процессе обработки, возможность обрабатывать детали произвольной формы, в том числе с отверстиями, высокая адгезия модифицированных слоев с матрицей. Для практического применения предложенного подхода разработана методика выбора параметров регламентированного твердорастворимого упрочнения поверхностного слоя титановых сплавов, которая состоит: из методики определения оптимального уровня твердорастворимого упрочнения поверхности  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов титана в зависимости от прогнозируемой глубины упрочненной зоны; из методики определения оптимальных температурно-временных и определения газодинамических параметров термодиффузионного насыщения изделий из  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов из разреженной контролируемой кислородсодержащей газовой среды для достижения оптимального уровня поверхностного упрочнения.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, термодиффузионное насыщение, поверхностный слой, уровень упрочнения.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Завдяки високій питомій міцності титан та його сплави належать до ряду перспективних конструкційних матеріалів для авіації, де заміна сталевих деталей на титанові приводить до значного зниження маси конструкцій [1–4]. Тому у світовому літакобудуванні для підвищення науково-технічного рівня розробок та виробництва планується збільшення долі титанових сплавів в конструкціях літаків. Однак деякі їх природні фізико-механічні властивості (підвищена реакційна здатність до взаємодії з киснем та азотом, низькі анти-

фрикційні та нестабільні втомні властивості тощо) звужують спектр використання [5–7]. Одним з шляхів покращення вищезгаданих властивостей є інженерія поверхні титанових сплавів, в тому числі термодифузійним насиченням з контрольованого газового середовища [8].

На відміну від інших методів інженерії поверхні для термодифузійного насичення характерні відтворюваність процесу, обмежена кількість технологічних параметрів, які необхідно контролювати в процесі обробки, можливість обробляти деталі довіль-

ної форми, в тому числі з отворами, висока адгезія модифікованих шарів з матрицею завдяки можливості формуванню глибокого дифузійного підшару, що вказує на доцільність і ефективність його використання при інженерії поверхні титанових сплавів.

При термодифузійному насиченні в металі формується поверхневий газонасичений шар певної глибини із градієнтом концентрації домішки проникнення (наприклад, кисню). Оскільки газонасиченому шару властива підвищена твердість, його називають зміцненим шаром. Тобто маємо справу з, так званим, твердорозчинним зміцненням поверхнього шару титанових сплавів. Газонасичений шар впливає на експлуатаційні властивості виробів в цілому, тому при виборі режимів термообробки (температурно-часових та газодинамічних параметрів середовища) необхідно враховувати взаємодію титанових сплавів з елементами втілення та прогнозувати наслідки її впливу на експлуатаційні властивості виробів.

Існує загальноприйнята думка, що газонасичені шари знижують втомні властивості титанових сплавів [9–12]. Менш відомі експериментальні дані, що свідчать про сприятливий вплив газонасичених шарів певної товщини і будови на механічні властивості титанових сплавів [13, 14].

На даний час нормативною оцінкою експлуатаційної придатності виробів з титанових сплавів з газонасиченими шарами є відносний приріст поверхневої твердості. Згідно з існуючими нормативами потрібно видаляти газонасичений шар твердість якого на 25% перевищує твердість серцевини металу. Однак такий універсальний критерій оцінки допустимого поверхнього зміцнення (25% для всіх титанових сплавів) в результаті газонасичення не враховує особливостей фазово-структурного стану металу, вихідного рівня міцності, відносної товщини зміцненого шару, тощо [10].

У роботах [13, 14], ґрунтуючись на численних експериментальних даних, виявлено параметри зміцнених шарів, що дозволяють підвищити роботоздатність виробів за циклічних навантажень.

Однак для практичного застосування потрібно розробити методику вибору параметрів хіміко-термічної обробки для формування певного рівня зміцнення поверхнього шару.

Метою роботи є запропонувати номограми, які дозволять вибрати параметри ( $K_{opt}$ ,  $l$ ) поверхнього зміцнення титанових сплавів  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів задавши бажане значення межі втоми  $\sigma_{-1}$ , а також навести температурно-часові та газодинамічні параметри термодифузійного насичення для отримання певного рівня поверхнього зміцнення.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** В основу такого підходу покладено встановлений ефект підвищення межі витривалості  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану за певного співвідношення параметрів зміцнених шарів  $K$  – відносного приросту твердості поверхні або ступеня поверхнього зміцнення ( $K = ((H_{\mu}^n - H_{\mu}^c)/H_{\mu}^c) \times 100\%$ , де:  $H_{\mu}^n$  – твердість поверхні металу;  $H_{\mu}^c$  – твердість його серцевини) та  $l$  – глибини зміцненої зони (рис. 1).

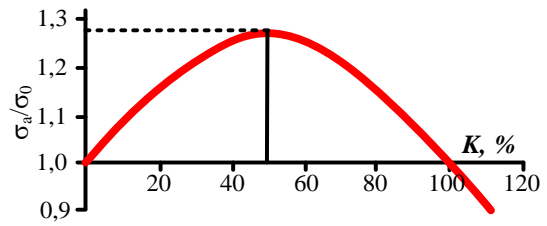


Рисунок 1 – Залежність межі витривалості титанових сплавів VT1-0 і VT5 від рівня поверхнього зміцнення  $K$ :  $\sigma_0$  – границя витривалості без поверхнього зміцнення;  $\sigma_n$  – границя витривалості після поверхнього зміцнення

Запропонований підхід дозволяє:

1. Підвищити втомні характеристик виробів з  $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -сплавів титану на 20...40% [13, 14].
2. Порівняно з вихідним станом найбільший відносний приріст межі витривалості ( $\Delta\sigma_{-1}$ ) зразків з ХТО-зміцненим поверхневим шаром відмічено для низько та середнє міцних сплавів VT1-0 та OT4-1. Так для сплаву VT1-0  $\Delta\sigma_{-1} = 35\%$  при відносному прирості поверхневої твердості  $K = 70\%$  та  $l = 30$  мкм. Для псевдо- $\alpha$ -сплаву OT4-1  $\Delta\sigma_{-1} = 38\%$  при відносному прирості поверхневої твердості  $K = 35\%$  та  $l = 45-50$  мкм. Для  $\alpha$ -сплаву VT5  $\Delta\sigma_{-1} = 22\%$  при відносному прирості поверхневої твердості  $K = 55\%$  та  $l = 30-35$  мкм [13, 14].
3. Суміщати операції зміцнення поверхні виробів зі штатною вакуумною термообробкою.

Згідно з нормативними документами вакуумний відпал виробів з  $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -сплавів титану проводять у широкому діапазоні температур  $520^{\circ}\text{C} \leq T \leq 850^{\circ}\text{C}$  [3, 12]. Температура вакуумного відпалу залежить від марки титанового сплаву, типу напівфабрикату (табл. 1) та призначення вакуумного відпалу (зняття залишкових напружень, зневоднення тощо), а тривалість вакуумного відпалу – від товщини металу.

Таблиця 1 – Параметри термообробки напівфабрикатів з  $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -сплавів титану для формування на оптимальний рівень поверхнього зміцнення

Марка сплаву		VT1-0	VT5	OT4-1
Вакуумна термообробка	Температура відпалу, $^{\circ}\text{C}$	520 - 690	600 - 850	640 - 760
	Тривалість відпалу, год (при товщині максимального перерізу $b = 2-50$ мм)	0,5-3		
Термодифузійне насичення	Температура обробки, $^{\circ}\text{C}$	700	750	700
	Тривалість обробки, год	4	3	3

Як видно з наведених у табл. 1 даних діапазон нормативних температурно-часових параметрів режимів вакуумного відпалу  $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -сплавів титану повністю співпадає з таким, що застосований для регламентованого твердорозчинного зміцнення поверхневих шарів титанових сплавів для підвищення межі витривалості металу.

Суттєвою відмінністю режимів термодифузійного регламентованого твердорозчинного насичення поверхневих шарів металу є необхідність контролю за параметрами середовища: загальний тиск  $P$ , парціальний тиск кисню  $p_O$ , швидкість натікання в вакуумну систему  $I$ . Це вимагає оснащення вакуумного термічного обладнання системами контролю за газодинамічними параметрами середовища та відповідного впливу на них (газоаналізатори, натікачі тощо).

4. Обробляти вироби складної форми без зміни їх геометрії та розмірів.

Одним з недоліків існуючих методів поверхневого зміцнення, зокрема контактних, є жорсткі обмеження щодо форми та розмірів оброблюваних виробів. Запропонований підхід позбавлений цих недоліків і дозволяє обробляти вироби будь-якої форми, навіть з порожнинами. Окрім того за обраних температурно-часових та газодинамічних параметрів термодифузійного насичення ( $650^\circ\text{C} \leq T \leq 750^\circ\text{C}$ ,  $10^{-4} \text{ Pa} \leq P \leq 10^{-2} \text{ Pa}$ ,  $1 \text{ год} \leq \tau \leq 5 \text{ год}$ ) не відбувається зміни геометрії та розмірів виробів та погіршення вихідної шорсткості поверхні.

5. Розширити межі експлуатаційної придатності виробів з газонасиченими шарами.

За існуючими нормативами на виробках з  $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -сплавів титану потрібно видаляти газонасичені шари, твердість яких більш ніж на 25% перевищує твердість серцевини. Даний критерій потребує корекції. Він повинен враховувати вплив фазово-структурного стану металу на його чутливість до присутності газонасичених шарів і вплив відносної товщини зміцненого шару, що переконливо показано в роботах [14, 15].

Для практичного застосування запропонованого підходу розроблено методику вибору параметрів регламентованого твердорозчинного зміцнення поверхневого шару титанових сплавів, яка складається:

- з методики визначення оптимального рівня твердорозчинного зміцнення поверхні  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану залежно від прогнозованої глибини зміцненої зони;

- з методики визначення оптимальних температурно-часових і газодинамічних параметрів термодифузійного насичення виробів з  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів з розрідженого контрольованого кисневмісного газового середовища для досягнення оптимального рівня поверхневого зміцнення.

Методика визначення оптимального рівня твердорозчинного зміцнення поверхні  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану. За експериментальними даними побудовані номограми для вибору оптимальних параметрів ( $K_{\text{опт.}}$ ,  $l$ ) поверхневого зміцнення досліджуваних  $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -титанових сплавів ВТ1-0, ВТ5, ОТ4-1 та визначення відповідної межі втоми  $\sigma_{-1}$  (рис. 2). Пропонується два можливих алгоритми

вибору оптимальних параметрів твердорозчинного зміцнення поверхневих шарів  $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -титанових сплавів ВТ1-0, ВТ5, ОТ4-1:

- I – за одним з прогнозованих параметрів зміцнення поверхневого шару металу ( $K$  або  $l$ ). У цьому випадку даний параметр зумовлений режимом термообробки, наприклад, температурою та тривалістю вакуумного відпалу, що зумовлює глибину зміцненої зони, або наперед заданою глибиною зміцненого шару;

- II – за досяжною межею витривалості металу. У даному випадку передбачається широкий діапазон температурно-часових параметрів обробки у межах якого необхідно досягнути якнайвищої межі витривалості металу в результаті поверхневого зміцнення.

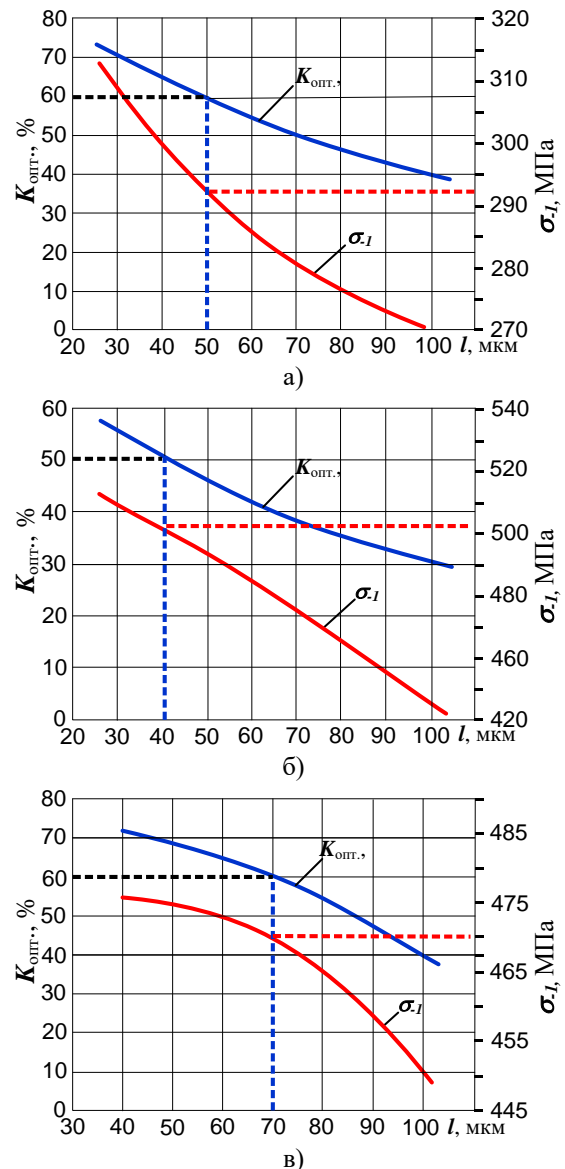


Рисунок 2 – Номограми для вибору оптимальних параметрів ( $K_{\text{опт.}}$ ,  $l$ ) поверхневого зміцнення сплавів ВТ1-0 (а), ВТ5 (б), ОТ4-1 (в) та визначення досяжною межі втоми  $\sigma_{-1}$

Наведемо приклади вибору параметрів поверхневого зміцнення за I та II алгоритмами.

I – за технічними умовами на виріб з титанового сплаву ВТ1-0 глибина зміцненого шару повинна

дорівнювати 50 мкм. Для визначення  $K_{\text{опт}}$  проектуємо значення 50 мкм з осі  $X$  на криву  $K_{\text{опт}}$ , а потім з останньої на вісь  $Y$ . Знаходимо, що оптимальний рівень поверхневого зміцнення повинен дорівнювати  $K_{\text{опт}} = 60\%$  (рис. 2 а). Для визначення очікуваних значень межі витривалості проектуємо точку перетину на кривій  $K_{\text{опт}}$  на криву  $\sigma_{-1}$ , а з неї на праву вісь  $Y$ . Знаходимо, що за вибраних параметрів поверхневого зміцнення очікуваний рівень межі витривалості дорівнюватиме 292 МПа.

$II$  – задана межа втоми для сплаву ОТ4-1 складає 470 МПа. Необхідно визначити параметри твердорозчинного зміцнення поверхневого шару металу. Проектуємо значення  $\sigma_{-1} = 470$  МПа з правої осі  $Y$  на криву  $\sigma_{-1}$ , а з неї на криву  $K_{\text{опт}}$ . Знаходимо, що для досягнення заданого рівня межі втоми необхідно створити зміцнений шар глибиною 70 мкм з рівнем поверхневого зміцнення  $K_{\text{опт}} = 60\%$ .

Методика визначення температурно-часових і газодинамічних параметрів термообробки виробів з  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану. Дана методика призначена для визначення температурно-часових і газодинамічних параметрів вакуумної хіміко-термічної обробки виробів з  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану для досягнення регламентованого (оптимального за втомними властивостями) рівня поверхневого зміцнення. Цей рівень визначається за методикою, наведеною у попередньому підрозділі.

Методика визначення температурно-часових і газодинамічних параметрів термообробки виробів з  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану ґрунтується на фізико-математичній моделі, яка наведена у розділі 6. Модель дозволяє вирішувати не тільки пряму задачу – визначати ступінь поверхневого зміцнення та розмір газонасиченого шару залежно від газодинамічних та температурно-часових параметрів ХТО, а й зворотню – за необхідним ступенем поверхневого зміцнення та розміром газонасиченого шару знаходити газодинамічні та температурно-часові параметри Хіміко-термічної обробки (ХТО). Тобто вирішувати задачу оптимізації режимів ХТО.

$$\left\{ \begin{array}{l} K/l = \text{optimum} \\ H(x,t) = K_{\alpha} \cdot C_0 \cdot \left[ \text{erfc}(x/2\sqrt{Dt}) - \exp(hx + h^2Dt) \cdot \text{erfc}(x/2\sqrt{Dt} + h\sqrt{Dt}) \right] + H_0 \\ \alpha_0(T,P) = \left[ a \cdot \ln(P) + b \right] \cdot \exp\left(\frac{-E_{\alpha}}{RT}\right) \\ D(T) = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_{\alpha}}{RT}\right) \\ l = x, H(x,t) = H_0 + \delta \end{array} \right. \Rightarrow T, P, t \quad (3)$$

За цими рішеннями побудовані номограми (рис. 3 а), б), в)), які дають можливість визначати оптимальні режими вакуумної хіміко-термічної обробки виробів із  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану для досягнення регламентованого рівня поверхневого зміцнення.

Запропонована методика дозволяє не тільки призначати температурно-часові та газодинамічні параметри хіміко-термічної обробки виробів для досягнення заданого рівня поверхневого зміцнення, але й корегувати існуючі режими вакуумної термооброб-

Виходячи з експериментально отриманих оптимальних співвідношень ступеня твердорозчинного зміцнення до розміру газонасиченого шару для  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану вирішені зворотні задачі. Для цього вирішувалась задача знаходження розв'язків системи рівнянь для заданого оптимального відношення  $K/l$ .

За визначенням  $K = ((H(0, t) - H_0) \times 100\%) / H_0$ .

$$H(x, t) = K_{\alpha} \cdot C_0 \cdot \left[ \text{erfc}(x/2\sqrt{Dt}) - \exp(hx + h^2Dt) \cdot \text{erfc}(x/2\sqrt{Dt} + h\sqrt{Dt}) \right] + H_0, \quad (1)$$

де  $h = \alpha/D$ , константа фазово-граничної реакції  $\alpha(T,P) = [a \cdot \ln(P) + b] \cdot \exp(-E_{\alpha}/RT)$  [см/с];  $a, b, E$  – наведені у табл. 2 для кожного сплаву,  $D = D(T)$  – коефіцієнт дифузії кисню в титані.

Таблиця 2 – Коефіцієнти та енергія активації для деяких титанових сплавів

Сплав	$a$ , см/с	$b$ , см/с	$E$ , Дж/моль
BT1-0	0,077	0,65	131 000
BT5	0,098	0,82	133 000
OT4-1	0,059	0,58	125 000

Розрахунковий розмір газонасиченого шару визначали як відстань від поверхні ( $x = 0$ ) до точки перетину розподілу твердості з верхньою границею розкиду твердості серцевини ( $H_0 + \delta$ ), де  $\delta$  – розкид твердості серцевини, визначається експериментально [15]:

$$l = x_i, \quad H(x_i, t) = H_0 + \delta. \quad (2)$$

Таким чином, сумісним рішенням рівнянь визначали оптимальні параметри режимів вакуумної термічної обробки.

ки виробів з  $\alpha$ - і псевдо- $\alpha$ -сплавів титану за допусковим рівнем поверхневого зміцнення. Це забезпечує експлуатаційну надійність виробів з титанових сплавів з газонасиченими шарами. Алгоритм дій для корегування існуючих режимів вакуумної термообробки наведений на рис. 4.

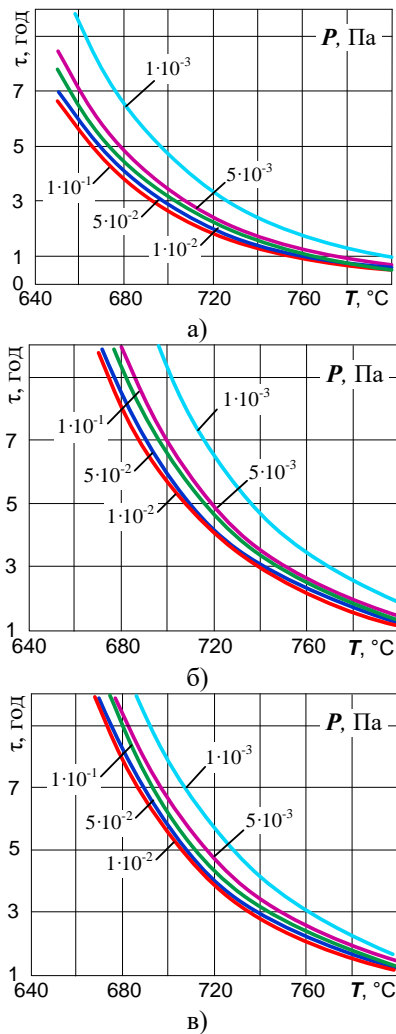


Рисунок 3 – Номограми для визначення параметрів обробки для формування оптимального рівня поверхневого зміцнення на виробів з сплавів: а – VT1-0; б – VT5; в – OT4-1

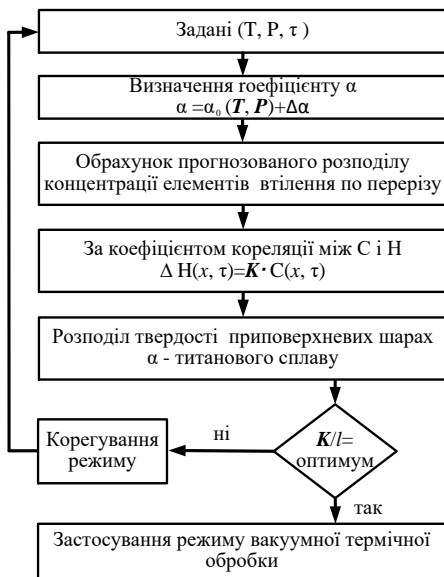


Рисунок 4 – Алгоритм корегування існуючих режимів вакуумної термообробки виробів з α- і псевдо-α-сплавів титану для досягнення оптимального рівня зміцнення поверхневого шару

**ВИСНОВКИ.** Для підвищення втомної міцності титанових сплавів у роботі запропоновано методику вибору оптимальних параметрів зміцнених шарів (рівня зміцнення та глибини зміцненої зони). На основі експериментальних досліджень розроблено номограми для визначення температури, тривалості обробки і розрідження кисневмісного газового середовища з метою формування поверхневого зміцненого шару з заданими характеристиками на титані. Наведена методика дозволяє підвищити експлуатаційну надійність виробів з титанових сплавів за рахунок хіміко-термічної обробки в певному температурно-часовому і газодинамічному діапазоні.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Lutjering G., Williams J. C. Titanium. 2nd ed., Berlin, Springer, 2007. 438 p.
2. Oshida Y. Bioscience and bioengineering of titanium materials, Elsevier, 2007. 430 p.
3. Moiseyev V. N. Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications. London-New York-Singapore.: Taylor & Francis Group, 2006. 207 p.
4. Hideki F., Takahashi K., Yoshito Y. Application of titanium and its alloys for automobile parts. *Nippon Steel Technical Report*. 2003, No 88. pp. 70–75.
5. Fukai H., Iizumi H., Minarawa K., Ouchi Ch. The effects of the oxygen-enriched surface Layer on mechanical properties of α+β type titanium alloys. *ISIJ International*. 2005. Vol. 45 (1). pp. 133–141.
6. Dong H., Li X. Y. Oxygen boost diffusion for the deep-case hardening of titanium alloys, *Materials Science and Engineering*, 2000, A280, pp. 303–310.
7. Sha W., Malinov S. Titanium alloys: modeling of microstructure, properties and applications, 2009, Woodhead Publishing Limited, 569 p.
8. Pohrelyuk I., Fedirko V. Chapter 7. “Chemico-Thermal Treatment of Titanium Alloys – Nitriding”. Titanium Alloys - Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications”, edited by A.K.M. Nurul Amin, 2012, pp. 141–174.
9. Ebrahimi A. R., Zarei F., Khosroshahi R. A Effect of thermal oxidation process on fatigue behavior of Ti-4Al-2V alloy. *Surface & Coatings Technology*. 2008, № 203. pp. 199–203.
10. Abdallah Z., Perkins K., Williams S. Alpha-case kinetics and surface crack growth in the high-temperature alloy TIMETAL 834 under greep conditions. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2012, A, Vol. 43A (12), pp. 4647–4654.
11. Leyens C. P. Manfred Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. 2003, Wiley-VCH, weinheim, 532 p.
12. Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н., Лошакова Н. И. Титановые сплавы для морской техники. СПб.: Политехника, 2007. 387 с.
13. Fedirko V. M., Luk'yanenko A. G., Pohrelyuk I. M., Trush V. S. Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment. *Materials Performance and Characterization*. 2017, Vol 6(4), pp. 642–655.
14. Fedirko V. M., Luk'yanenko O. H., Trush V. S. Influence of the diffusion saturation with oxygen on the

durability and long-term static strength of titanium alloys. *Materials science*, 2014, Vol. 50(3), pp.415–420.

15. Александров А. В., Прудковский Б. А. Разные грани титана и его сплавов. *Титан-2005*. №1(16). С. 64–70.

#### METHOD OF SELECTING THE PARAMETERS OF THERMAL DIFFUSION SATURATION OF TITANIUM ALLOYS TO ACHIEVE THE PREASSIGNED LEVEL OF SURFACE STRENGTHENING

V. Trush, V. Fedirko, A. Lukyanenko

Karpenko Physical and Mechanical Institute of NAS of Ukraine

vul. Naukova, 5, Lviv, 79060, Ukraine. E-mail: trushvasyl@gmail.com

**Purpose.** The purpose of the article is to develop an algorithm for selecting the parameters of chemical heat treatment (temperature, processing time, gas medium rarefaction) of titanium alloys to form hardened surface layers with specified parameters (hardening level, hardened layer thickness) that will ensure the maximum increase in fatigue strength under cyclic loading. **Methodology.** The method of plotting nomograms was used to determine the optimal ratio of the level of hardening and the thickness of the hardened layer, as well as plotting a nomogram to determine the optimal values of temperature, processing time, rarefaction of the gaseous medium. **Results.** Based on the analysis of the results of experimental studies, the optimum ratios of the parameters of the level of hardening and the thickness of the hardened zone of the surface layer were established; the range of temperature, duration of treatment and rarefaction of an oxygen-containing gas medium for the treatment of titanium alloys with the aim of forming a surface hardened layer with specified characteristics is given. **Originality.** For the first time the ratio of the level of hardening and the thickness of the hardened layer, which is formed by chemical-thermal treatment to increase the fatigue strength of titanium alloys, is proposed. **Practical value.** The proposed technique provides an increase in the operational reliability of products made of titanium alloys due to chemical heat treatment in a certain temperature-time and gas-dynamic range. Treatment of products from titanium alloys according to the developed method allows not only to assign temperature-time and gas-dynamic parameters of chemical-thermal treatment of products to achieve a given level of surface hardening, but also to correct the existing vacuum heat treatment of products from  $\alpha$ - and pseudo- $\alpha$ -titanium alloys with the level of surface hardening. This ensures the operational reliability of products made of titanium alloys with a gas-saturated layer. This ensures the operational reliability of products made of titanium alloys with gas-saturated layers. References 15 tables 2, figures 4.

**Key words:** titanium alloys, thermal diffusion saturation, surface layer, strengthening level.

#### REFERENCES

- Lutjering, G., Williams, J. C. (2007), Titanium, 2nd ed., Berlin, Springer, 438 p.
- Oshida, Y., (2007), Bioscience and bioengineering of titanium materials, Elsevier, 430 p.
- Moiseyev, V. N. (2006), Titanium Alloys, Russian aircraft and aerospace applications, London-New York-Singapore: Taylor & Francis Group, 207 p.
- Hideki, F. Takahashi, K., Yoshito, Y. (2003), Application of titanium and its alloys for automobile parts, *Nippon Steel Technical Report*, No 88. pp 70–75.
- Fukai, H., Iizumi, H., Minarawa, K., Ouchi, Ch. (2005), The Effects of the oxygen-enriched surface layer on mechanical properties of  $\alpha+\beta$  type titanium alloys, *ISIJ International*, Vol. 45 (1). pp. 133-141.
- Dong, H., Li, X. Y. (2000), Oxygen boost diffusion for the deep-case hardening of titanium alloys, *Materials Science and Engineering*, A280, pp. 303–310.
- Sha, W., Malinov, S. (2009), Titanium alloys: modeling of microstructure, properties and applications, Woodhead Publishing Limited, 569 p.
- Pohrelyuk, I., Fedirko, V. (2012), Chemico-thermal treatment of titanium alloys – nitriding, Titanium alloys - towards achieving enhanced properties for diversified applications, Chapter 7, edited by A.K.M. Nurul Amin, pp. 141-174.
- Ebrahimi, A. R., Zarei, F., Khosroshahi, R. A. (2008), Effect of thermal oxidation process on fatigue behavior of Ti-4Al-2V alloy, *Surface & Coatings Technology*, № 203. pp. 199–203.
- Abdallah, Z., Perkins, K., Williams, S. (2012), Alpha-case kinetics and surface crack growth in the high-Temperature alloy TIMETAL 834 under creep Conditions, *Metallurgical and Materials Transactions*, A, Vol. 43A (12), pp. 4647-4654.
- Leyens, C. P., Manfred, A. (2003), Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications, Wiley-VCH, Weinheim, 532 p.
- Gorinin, S. V., Ushkov, S. S., Hatuncev, A. N., Loshakova, N. I. (2007), *Titanovie splavy dlya morskoy tekhniki* [Titanium alloys for marine technique], SP, p. 387.
- Fedirko, V. M., Luk'yanenko, A. G., Pohrelyuk, I. M., Trush, V. S. (2017), Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment, *Materials Performance and Characterization*, Vol. 6(4), pp. 642-655.
- Fedirko, V. M., Luk'yanenko, O. H., Trush, V. S. (2014), Influence of the Diffusion Saturation with Oxygen on the durability and long-term static strength of titanium alloys, *Materials science*, Vol. 50(3), pp. 415–420.
- Aleksandrov, A. V., Prudkovskiy, B. A. (2005), *Raznyye grani titana i yego splavov* [Different sides of titanium and its alloys], *Titan*, Vol. 1 (16), pp. 64-70.

Стаття надійшла 14.01.2019.