

Вплив твердорозчинного зміцнення на втомну довговічність титанового сплаву VT1-0

В. С. Труш

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

В роботі показано можливість підвищення втомної довговічності титанового сплаву VT1-0 шляхом регламентованого твердорозчинного зміцнення поверхні. Визначено оптимальний рівень твердорозчинного зміцнення для досягнення максимальної втомної довговічності за умов циклічного розтягу. Зроблена спроба пояснити фізичну природу встановленого ефекту.

Підвищення втомної міцності і довговічності виробів з титанових сплавів може бути досягнуто за допомогою методів інженерії поверхні. У Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України запропоновано концепцію інженерії поверхні титанових сплавів дифузійними методами [1]. У рамках даної концепції розроблено спосіб підвищення втомної міцності та довговічності α - і псевдо- α -сплавів титану шляхом регламентованого твердорозчинного зміцнення поверхневого шару металу з розрідженого контрольованого кисневмісного газового середовища. Попередніми дослідженнями встановлено, що спосіб забезпечує 20 – 40 % підвищення втомних властивостей α - і псевдо- α -сплавів титана за умов чистого згину та обертового згину [1, 2]. Однак дослідження впливу твердорозчинного зміцнення поверхневого шару металу методом дифузійного насичення на втомну довговічність за умов циклічного розтягу не проводили, хоча значна частина виробів з титанових сплавів під час експлуатації зазнає втомного руйнування саме за цих умов навантаження.

Метою роботи було дослідження впливу регламентованого твердорозчинного зміцнення поверхневого шару титанового сплаву VT1-0 на втомну довговічність за умов циклічного розтягу. Досліджено технічно чистий титан VT1-0 (пл. 7478, серія 43472, ГОСТ 22178-76, відпалений стан). Діаметр робочої частини досліджуваного зразка 3 мм. На титановому сплаві VT1-0 було сформовано поверхневі газонасичені шари глибиною 50 – 60 мкм з різним рівнем зміцнення K : 5, 30, 40 – 50, 65 – 70 %, які визначали за величиною відносного приросту твердості поверхні $K = ((H_{\mu}^s - H_{\mu}^c) / H_{\mu}^c) \cdot 100$ %, де H_{μ}^s – твердість поверхні металу, H_{μ}^c – твердість серцевини металу.

Для формування вищезгаданих поверхневих зміцнених шарів проводили насичення титанових сплавів з розрідженого газового кисеньвміщуючого середовища в діапазоні газодинамічних параметрів ($P = 1,33 \cdot 10^4 - 1,33 \cdot 10^3$ Па, $I = 5 \cdot 10^5$ Па \cdot с⁻¹) за температури обробки $T = 750$ °С протягом трьох годин.

Втомні дослідження на циклічний розтяг проводили на установці з інерційним силозбудженням від обертальних неврівноважених мас з частотою навантаження в інтервалі $\nu = 6 - 8$ Гц і коефіцієнтом асиметрії циклу напруження $R = 0,2$.

Згідно результатів випробувань твердорозчинне зміцнення поверхневого шару металу методом дифузійного насичення позитивно впливає на втомну довговічність титанового сплаву за умов циклічного розтягу і залежить від ступеня поверхневого

зміцнення K (рис. 1). Максимальну кількість циклів до руйнування зафіксовано при рівні зміцнення $K = 40 - 50\%$ і становить ~ 122 тис. циклів, що в 2,5 рази перевищує значення у вихідному стані. При інших рівнях зміцнення K кількість циклів до руйнування є більшою відносно вихідного стану, але меншою, ніж при $K = 40 - 50\%$.

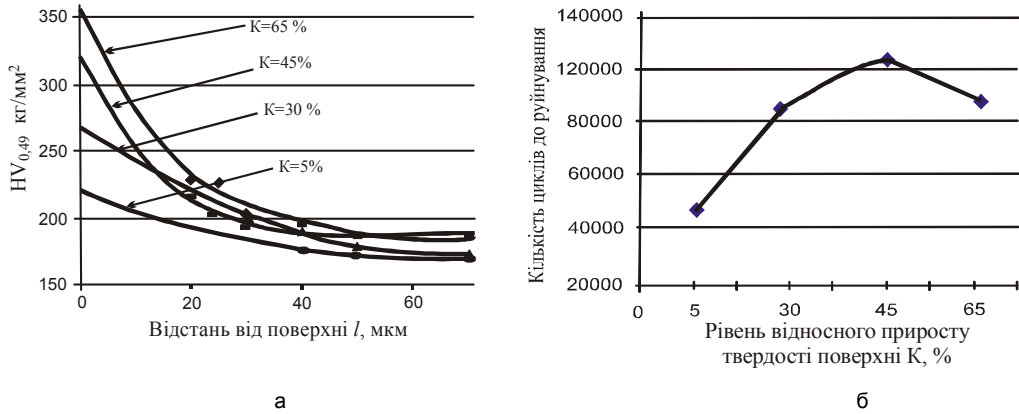


Рис. 1. Розподіл мікротвердості за перерізом сплаву ВТ1-0 (а) та кількість циклів до руйнування сплаву (б) залежно від рівня відносного приросту твердості поверхні K .

Згідно літературних даних твердорозчинне зміцнення впливає на субзеренну структуру, яка формується під час дифузійного насичення, зокрема твердорозчинне зміцнення впливає на перебудову дислокаційної структури і відповідно – на зміни субзеренної структури. До певного рівня зміцнення – пришвидшує, а з подальшим зростанням – затримує субструктурні зміни [2]. Можна припустити, що залежність параметрів субструктури (зокрема величини субзерен) від рівня твердорозчинного зміцнення повинна мати максимум. Тобто повинен існувати оптимальний, з точки зору формування субзеренної структури з мінімальними розмірами складових, рівень твердорозчинного зміцнення.

Такі результати були отримані в результаті рентгеноструктурних досліджень: зі збільшенням рівня поверхневого зміцнення від 0 до 40 – 50 % фіксується подрібнення субзеренної структури, з подальшим зростанням K до 65 – 70 % спостерігається її укрупнення. Тобто зміцнення на оптимальний рівень (для сплаву ВТ1-0 $K = 60 - 70\%$) сприяє найбільшому подрібненню кристалітів зерна, яке має місце при зміцнюючій обробці (рис. 2).

Ймовірно, що це, в свою чергу, сприяє розвитку оптимальної з точки зору втомної довговічності дислокаційної структури, оскільки подрібнення блоків мозаїки створює „стілки”, які гальмують розвиток мікропластичної деформації, зародження та розповсюдження втомних тріщин, що, можливо, і сприяє підвищенню межі витривалості металу. Таке трактування узгоджується з даними літератури, згідно яким субзеренній структурі з найменшими параметрами притаманна найбільша опірність циклічним навантаженням [3, 4].

Визначали також напруження 1-ого роду, що виникають у приповерхневих шарах титану внаслідок поверхневої обробки. Вони незначні і змінюються в межах кількох МПа (рис. 2 в). Якщо при рівні зміцнення $K = 5\%$ у приповерхневому шарі напруження практично відсутні (~ -1 МПа), то зміцнення титану призводить до виникнення стискуючих напружень до $-12 - -14$ МПа. Найбільші стискуючі напруження мають місце у зразків з коефіцієнтом зміцнення $K = 40 - 50\%$. Втім, незначний рівень напружень та вузький діапазон їх зміни в залежності від режиму

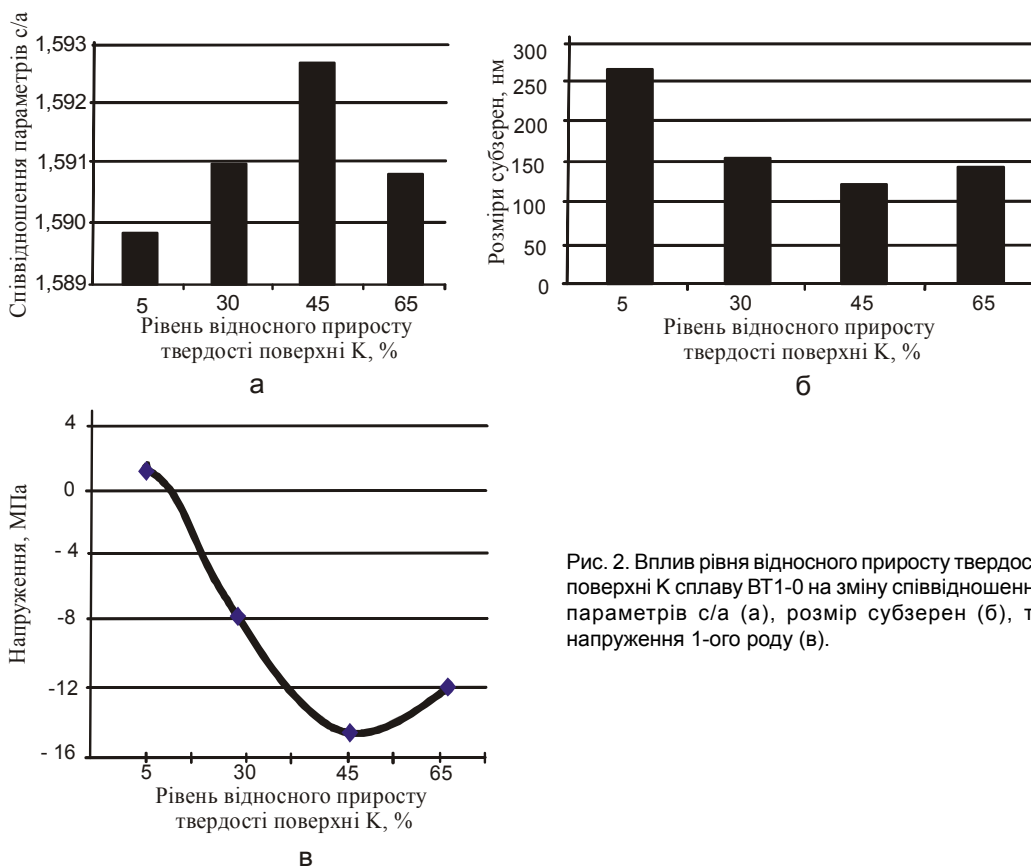


Рис. 2. Вплив рівня відносного приросту твердості поверхні К сплаву VT1-0 на зміну співвідношення параметрів c/a (а), розмір субзерен (б), та напруження 1-ого роду (в).

обробки дозволяє припускати відсутність домінуючого впливу напружень 1-ого роду в зміцненні матеріалу. Іншою складністю у трактуванні отриманих результатів щодо напружень є наявність градієнту приповерхневого зміцнення та складність його врахування при обрахунках.

За циклічних умов напруження в металі відбуваються незворотні фізичні процеси, які ще з перших циклів навантаження призводять до послаблення зв'язків кристалічної ґратки (зниження модуля пружності на ранніх стадіях циклічного деформування). Накопичення дефектів і розвиток пошкоджень в поверхневому шарі відбувається з випередженням по відношенню до серцевини металу. Тому природно очікувати, що це явище робить певний вплив на всі наступні процеси розвитку втомного пошкодження.

Таким чином показано, що регламентоване твердорозчинне зміцнення поверхневого шару титанового сплаву VT1-0 позитивно впливає на втомну довговічність за умов циклічного розтягу. Встановлено, що максимальна втомна довговічність за твердорозчинного зміцнення $K = 40 - 50 \%$ обумовлена одночасною дією таких чинників: найбільшою деформацією кристалічної решітки металу, максимальним подрібненням його субзеренної структури, виникненням максимального рівня стискуючих напружень. Вихід за межі даного рівня зміцнення призводить до порушення цього оптимуму: вичерпання запасу мікропластичності (метал окрихчується), недостатнім проробленням субзеренних структур.

Література

1. Федірко В.М., Пічугін А.Т., Лук'яненко О.Г. Оцінка експлуатаційної придатності виробів з титанових сплавів різних структурних класів з газонасиченими шарами // ФХММ. – 1996. – № 6. – С. 49 – 54.
2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник. Т. 9. Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / Під заг. ред. О.П. Осташа, В.М. Федірка. – Львів: Сполох, 2007. – 1068 с.
3. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справ. / А.А. Ильин. Б.А. Колачев, И.С. Польшкин. – М.: ВИС – МАТИ, 2009. – 520 с.
4. Иванова В.С, Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

Одержано 14.10.10

В. С. Труш

Влияние твердорастворного упрочнение на усталостную долговечность титанового сплава BT1-0

Резюме

Показана возможность повышения усталостной долговечности титанового сплава BT1-0 путем регламентированного твердорастворного упрочнение поверхностного слоя. Определен оптимальный уровень твердорастворного упрочнения, обеспечивающий максимальную усталостную долговечность в условиях циклического растяжения. Предложено объяснение физической природы установленного эффекта.

V. S. Trush

Effect of solid solution hardening on fatigue life of BT1-0 titanium alloy

Summary

The possibility to increase the fatigue life of BT1-0 titanium alloy by a diffusion of solid solution hardening of near-surface layer has been proved. The optimal level of solid solution hardening to achieve maximum fatigue life under cyclic tension is determined. It is shown the attempt to explain the physical nature of the established effect.