

Вплив стану поверхні деталей шасі з високоміцного титанового сплаву BT-22 в процесі випробувань на втому

А. О. Горпенко^{1*}, О. І. Семенець¹, О. М. Доній², К. О. Валуйська³

¹ДП “АНТОНОВ”

03062, Київ, Україна, вул. Академіка Туполєва, 1

*E-mail: timanz.ag@gmail.com

²”КПІ” імені Ігоря Сікорського

03056, Київ, Україна, пр-т Перемоги, 37

³Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України
03142, Київ, Україна, вул. Кржижановського, 3

Досліджено вплив стану поверхні на ресурс деталей шасі з високоміцного титанового сплаву BT-22 в ході випробувань на втому. Випробування проводили на спеціальних стендах, які імітують робочі навантаження на деталь типу «шток» на етапі прибирання-випуску шасі. Втомні випробування були проведені на чотирьох штоках. Штоки № 1—3 були зруйновані по вушках, шток № 4 витримав весь цикл навантажень та був досліджений в незруйнованому стані. Було встановлено, що поверхневі дефекти, які утворились на етапі виготовлення деталей, а також глибокі подряпини в зоні з підвищеною концентрацією напружень більш ніж в 5 разів знижують ресурс штоку № 3 порівняно з незруйнованим штоком № 4, що не мав явних дефектів поверхні. Виявлені поверхневі ушкодження в нехромованій ділянці штоків можуть бути усунені шліфуванням з подальшою полірою поверхні, що забезпечить необхідний ресурс деталі (шток № 4).

Ключові слова: високоміцний титановий сплав BT-22, шток, втомне руйнування, поверхневі дефекти, структура поверхневого шару.

Вступ

Державне підприємство “АНТОНОВ” є флагманом літакобудування в Україні. За час його існування з 1946 року виготовлено більше ніж 22 000 літаків різних типів та модифікацій [1]. В конструкціях літаків використовується великий перелік різних матеріалів та напівфабрикатів, в тому числі і з титанових сплавів [2, 3]. З високоміцного титанового сплаву BT-22 в літаках сімейства “Ан” виготовляють найбільш важко навантаженні деталі шасі та крила. Ці елементи конструкції літака добре зарекомендували себе з моменту впровадження їх у виробництво.

Шасі літаків мають різноманітні конструктивні елементи, ушкодження яких та передчасне руйнування може призвести до тривалого простою літака. Залежно від умов навантаження в деталях літака відбуваються процеси накопичення мікроушкоджень матеріалу під дією повторних або повторно змінних напружень, які спричиняють зародження втомної тріщини [4]. Явище втоми характеризується трьома стадіями: зародження тріщини, її розповсюдження і остаточне руйнування деталі [5]. Вивчення морфології руйнування показує, що в більшості випадків зародження тріщини починається від поверхні. Тому забезпечення якості поверхні

деталі є важливою задачею [6]. Титанові сплави дуже чутливі до поверхневих концентраторів напружень. Обробка їх поверхні має велике значення. В останній час широко використовують засіб електролітно-плазмового полірування, який добре підходить для обробки поверхні в менш доступних ділянках виробів. Цей метод полірування дозволяє значно поліпшити якість остаточної обробки поверхні (до $R_a = 0,05—0,06$ мкм) [7].

Якість деталей повинна забезпечувати високу надійність, особливо по відношенню до втомної міцності. Втомна міцність залежить як від стану поверхні [8], так і від фізико-механічних характеристик [9]. Перед тим, як деталь буде встановлена на літак, її досліджують на спеціальних стендах, які імітують робочі навантаження конкретної системи літака. Крім розподілу напружень в найбільш небезпечних елементах конструкції, аналізуючи ресурс роботи шасі, слід враховувати стан поверхні, який визначається геометричними, механічними та металургійними характеристиками. В більшості випадків на робочі поверхні деталей, які працюють в умовах тертя, наносять захисне покриття для покращення зносостійкості. Найпоширенішим методом для титанових сплавів є хромування поверхні [10]. Це багатоетапний процес, який потребує чіткого дотримання всіх вимог та правил нанесення покриття. Перед нанесенням покриття на певні ділянки деталей завчасно забезпечують захист тих її частин, які не будуть підлягати хромуванню. Одним з необхідних етапів нанесення хромового покриття є гідридна обробка поверхні [11]. Її застосовують тому, що на поверхні титану та його сплавів є відносно тонка природня оксидна плівка, яка гарно захищає поверхню від корозії, але заважає надійному зчепленню покриття з матрицею. Для усунення цієї плівки створюють проміжний шар. Для отримання на поверхні титану проміжної гідридної плівки титанові деталі обробляють в сірчаній або соляній кислотах або в сумішах цих кислот.

В нашій роботі досліджували вплив стану поверхні на ресурс деталей шасі з високоміцного титанового сплаву BT-22 на їх міцність під час втомних випробувань.

Матеріали і методи досліджень

На підприємстві виробника деталей для літака “Ан-140” на спеціальному стенді проводили кваліфікаційні випробування на втому. На стенді імітували робочі навантаження на етапі прибирання-випуску передньої опори шасі. Об'єктами дослідження були чотири деталі типу “штока”, виготовлені з високоміцного титанового сплаву BT-22.

Перший етап випробувань проводили без переміщення штока в стенді. Після напрацювань 42 543 циклів сталося руйнування вушка штока № 1, тоді як кількість циклів, згідно з програмою випробувань, повинна бути не менше 50 000 циклів.

Після проведення заходів щодо усунення дефектів і їх причин за результатами першого етапу випробувань було розпочато другий етап, який виконували з переміщенням штоку № 2. Були проведені повторні втомні випробування. Після напрацювань 39 980 циклів знову сталося руйнування вушка штока № 2.

Для покращення відповідності прикладених навантажень здійснювали додаткове калібрування стенду згідно з програмою випробувань. Третій етап випробувань також проводили з переміщенням штоку № 3. Після

напрацювань 36 673 циклів сталося його руйнування. Після заміни зруйнованого штоку № 3 на шток № 4 випробування повторили. Шток № 4 простояв весь цикл навантажень та був знятий зі стану після напрацювань 261 000 циклів, хоча заплановано було 50 000 циклів.

Структуру та поверхню руйнування деталей вивчали за допомогою оптичного (Neophot 21) та скануючого (TESCAN VEGA 3) мікроскопів.

Результати експерименту та їх обговорення

В ході роботи досліджено характер та причини руйнування трьох штоків № 1—3, які були зруйновані по кільцях та радіусних переходах R6 до циліндричної частини, та незруйнованого штоку № 4. На рис. 1 представлено їх зовнішній вигляд.

На поверхні радіусних переходів та в місцях зачистки зовнішніх кромek вушок штоків № 1—3, спостерігались грубі риски після механічної обробки. На зруйнованих кільцях вушок штоків № 1—3 видно ділянки пластичної деформації. В той же час огляд поверхні радіусних переходів циліндричної частини штоку № 4 виявив лише зглажені бороздки від різця (рис. 2).

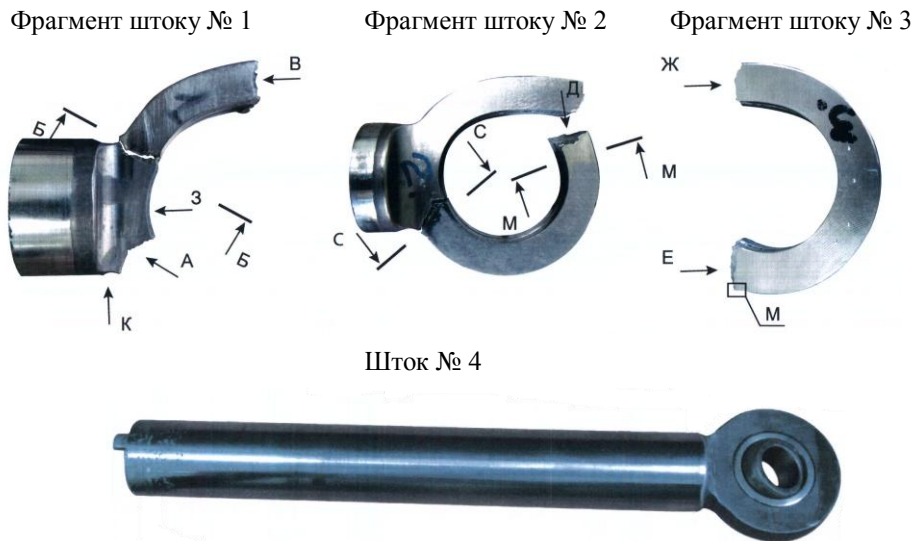


Рис. 1. Зовнішній вигляд фрагментів вушок зруйнованих штоків № 1—3 (а) та цілого штоку № 4 (б).

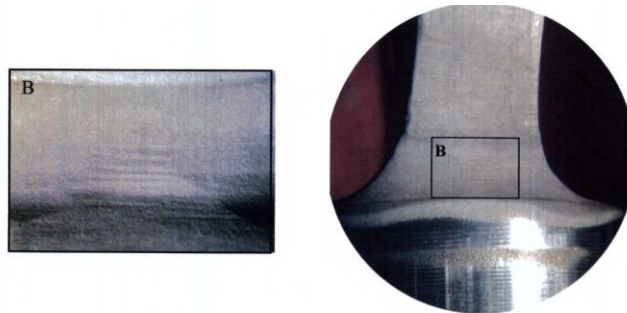


Рис. 2. Фотографії частки поверхні вушка штока № 4 в зоні радіусного переходу.

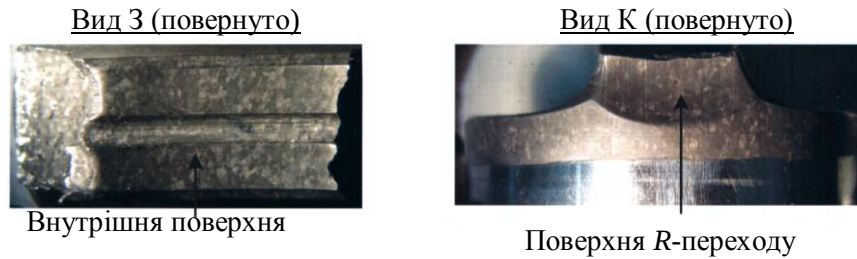


Рис. 3. Залишки травління на торцевій та внутрішній поверхнях вушок штоку № 1.

Ділянки нехромованої циліндричної поверхні штоків № 1—3, які примикали до покриття, усі радіусні переходи, торцева та частково внутрішня та бокові поверхні вушок були темно-сірого кольору. На боковій поверхні вушок штоку № 1 спостерігалися сліди зачистки. Дослідження на оптичному мікроскопі показало, що темний колір обумовлений утворенням тонкої плівки на поверхні деталі, під якою видно розтраву границь зерен (рис. 3). Беручи до уваги розміщення розтравлених ділянок, можна допустити, що вони виникли на етапі гідридної обробки штоків перед нанесенням покриття.

Ділянки нехромованої поверхні штока № 4, в тому числі й радіусні переходи, мали покриття у вигляді тонкої плівки темно-сірого кольору. Дослідження на оптичному мікроскопі не виявили розтрави границь зерен під плівкою покриття.

У ході макрофрактографічного дослідження встановлено, що вушки № 1—3 зруйнувалися за втомним механізмом. Зародження тріщини починалось в зоні радіусних переходів від зовнішніх кромek вушок або поблизу їх. В осередковій зоні штока № 3 виявлено грубу риску від механічної обробки вушка (округлення кромки, рис. 4).

Руйнування самих кілець вушок відбувалося після розвитку основних тріщин, мало статичний характер та починалося від технологічних канавок для змазки. Фотографії та схеми будови всіх зламів тріщин вушок № 1—3 наведено на рис. 5, 6.



Рис. 4. Риски на поверхні округлення кромки штоку № 3 в осередку тріщини.

При мікрофрактографічному дослідженні штоку № 1 в осередкових зонах було виявлено транскристалітний безбороздчатий мікрорельєф, який характерний для руйнування при втомі титанових сплавів. В зонах доламу спостерігався в'язкий ямковий мікрорельєф.

Дослідження не хромованої поверхні штоків та поверхні радіусних переходів при великому збільшенні підтвердило наявність розтравів зерен та їх границь (рис. 7).

Дослідження мікрошліфів, виготовлених в дольовому та у попе-рековому напрямках показало що:

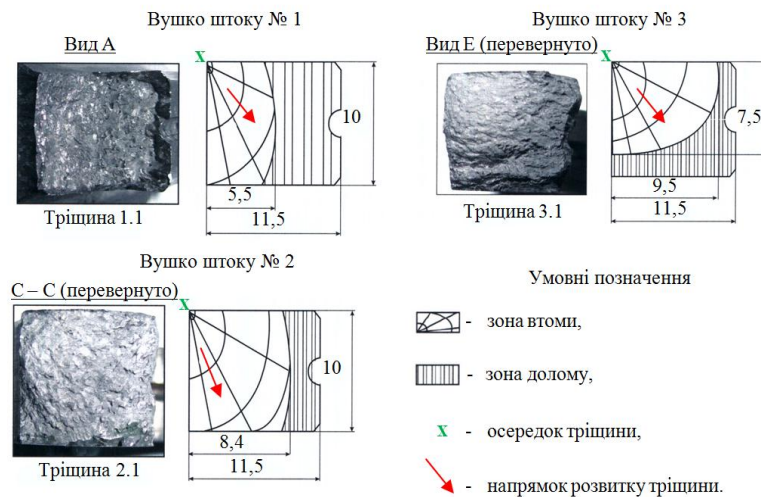


Рис. 5. Фотографії та схеми будови зламів вушок штоків № 1—3.

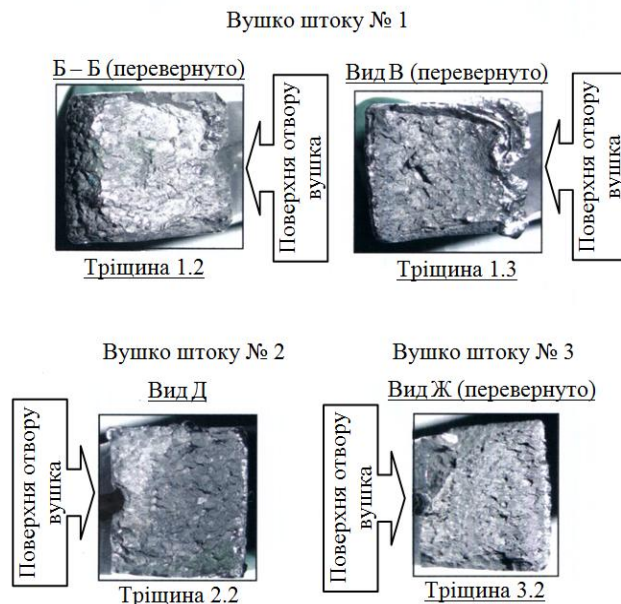


Рис. 6. Фотографії зламів, що утворилися в результаті статичного руйнування вушок № 1—3.

мікроструктура матеріалів штоків різнозерниста, а окантовка зерен граничної α -фази переривчаста, товщина окремих ділянок α -фази вздовж границь зерен досягала 10 мкм (рис. 8). Знайдені особливості мікроструктури могли сприяти локальному зниженню пластичності матеріалу.

Крім того, у ході дослідження мікрошліфів на поверхні радіусного переходу, а також на зовнішній та внутрішній поверхнях вушок виявлено мікроділянки з дефектним структурно-зміненим шаром глибиною 5—10 мкм, який, імовірно, утворився в результаті газонасичення поверхні деталей рис. 9.

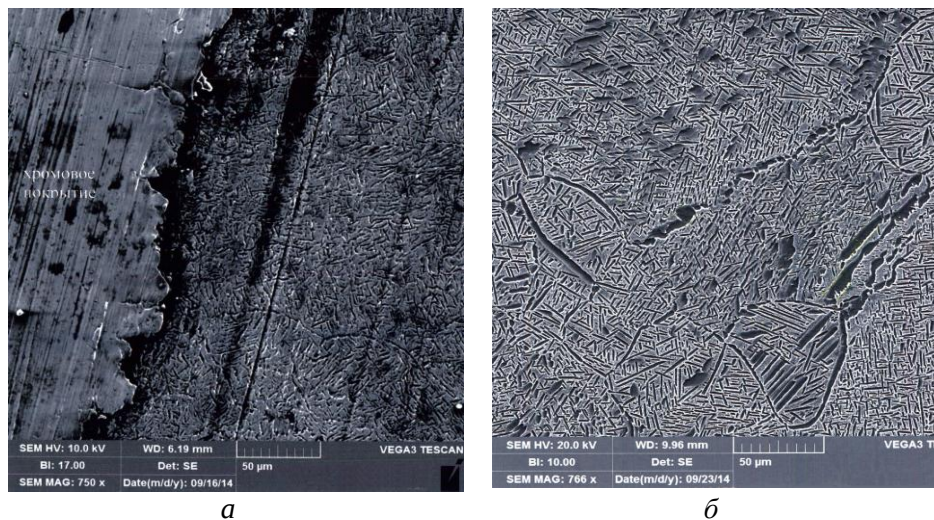


Рис. 7. Вид розтравів на циліндричній поверхні штоку № 2, що примикав до хромового покриття (а), та вид торцевої поверхні вушок штоків (б).

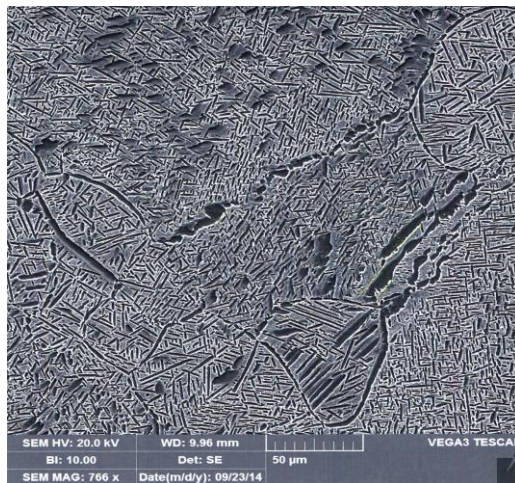


Рис. 8. Мікробудова матеріалу штоків.

В результаті порівняльного аналізу хімічного складу поверхневого шару і серцевини матеріалу деталей, проведеного за допомогою рентгенівського мікроаналізатора, відмінностей в елементному складі не встановлено. Підвищеного вмісту кисню в поверхневому шарі не виявлено (рис. 10). Отримані дані свідчать про те, що ділянки зі зміненою глобулярною структурою могли утворитися в результаті наводнення матеріалу під час гідридної обробки перед хромуванням.

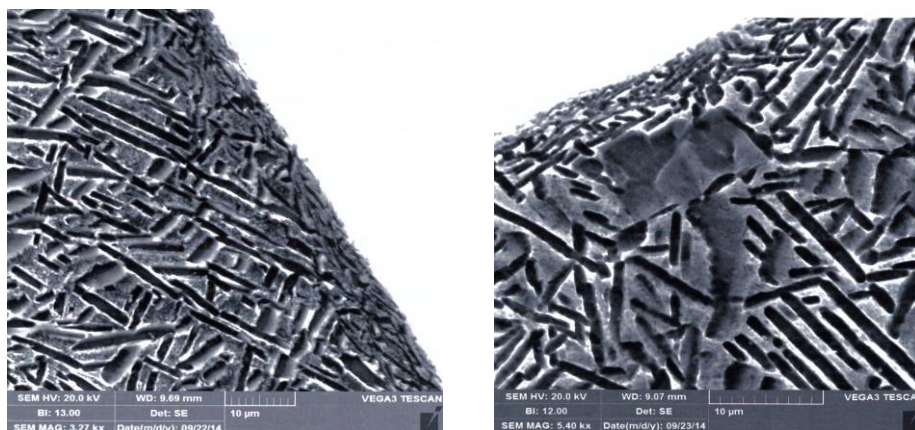


Рис. 9. Вид дефектного структурно-зміненого шару на ділянках радіусного переходу і на торцевій поверхні вушок штоків.

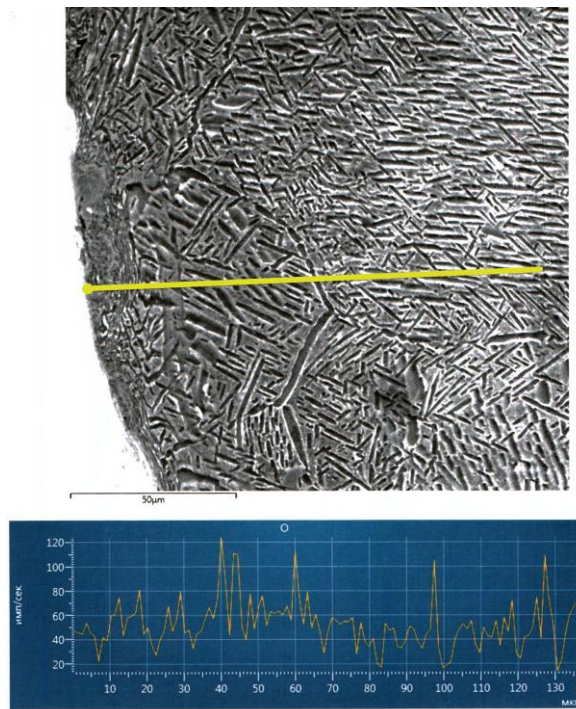


Рис. 10. Розподіл вмісту кисню вздовж лінії у напрямку від поверхні вушка до серцевини.

Аналіз виконаних досліджень дозволяє зробити висновок, що руйнування вушок штоків № 1—3 має втомний характер. Зародження тріщин починалось від поверхні радіусного переходу R6 у зовнішніх кромках вушок. Зародженню тріщин могли сприяти розтрави, наявність дефектного структурно зміненого шару глибиною до 10 мкм, що, очевидно, утворився на поверхні деталей в результаті наводнення через порушення технології виготовлення деталі, а також грубі риси від механічної обробки, нанесені під час заокруглення кромки вушка штоку № 3.

Висновки

Причиною руйнування штока № 1 стало відсутність осьових переміщень та невідповідність матеріалу кронштейна стенду для кріплення штока, що призвело до деформації в силовому блоці через змінну напруженого стану. Внаслідок утворення осьового люфту в результаті деформації вушка кронштейна виникли ударні навантаження на вушко штока № 1 в процесі випробувань.

Причиною руйнування штоку № 2 слугували додаткові переміщення, які призвели до появи ударних осьових навантажень за рахунок зміни характеристик і величин навантажень стенду на шток № 2.

Калібрування стенду, згідно з програмою випробувань, наблизило умови втомних випробувань до реальних навантажень шасі. Зразок № 4 за такого режиму тестування продемонстрував довговічність, яка в п'ять разів перевищує нормативні вимоги (50 000 циклів). У цьому зв'язку важливим є результат, отриманий на штоку № 3, де за таких же умов випробувань строк служби скоротився до 36 673 циклів.

В результаті комплексного дослідження встановлено, що пріоритетним фактором, який вплинув на передчасне руйнування штоку №3, були глибокі ризики від механічної обробки поверхні в найбільш навантаженому місці штоку № 3, а саме в місці R-переходу циліндричної частини до вушка. Своєчасне виявлення та усунення дефектів поверхні в найбільш навантажених місцях деталей значно збільшує ресурс деталей і забезпечує безперервну та безпечну експлуатацію в літаках.

Цитована література

1. <https://www.antonov.com/activity>
2. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств обзор. *Авиационные материалы и технологии*. Спецвыпуск 2. 2013. С. 25—36.
3. Цвиккер У. Титан и его сплавы. Москва: Металлургия, 1979. 512 с.
4. Банников М.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Исследование стадийности разрушения титановых сплавов в режиме много- и гигацикловой усталости на основе морфологии поверхности разрушения. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2015. № 3. С. 15—24.
5. Коллингз Е.В. Физическое металловедение титановых сплавов. Москва: Металлургия. 1988. 224 с.
6. Реченко Д. С. Обработка титановых и жаропрочных сплавов высокоскоростным шлифованием. Омский гос. техн. ун-т. 2008. С. 59—61.
7. Смыслов А. М., Смылова М. К., Мингажев А. Д., Селиванов К. С. Многоэтапная электролитно-плазменная обработка изделий из титана и титановых сплавов. *Вестник УГАТУ*. 2009. С. 141—145.
8. Валиев Р. Р., Модина Ю. М., Поляков А.В., Семенова И. П., Жернаков В. С. Усталостная прочность и особенности разрушения ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6. *Вестник УГАТУ*. 2016. С. 11—16.
9. Подрезов Ю. Н., Даниленко В. И. Анализ влияния повторной деформации на механическое поведение образцов титана, продеформированных методом винтовой экструзии. *Электронная микроскопия и прочность материалов*. Киев: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2009. Вып. 16. С. 68—79.
10. *Инструкция ВИАМ ПИ 1.2.089-78 "Хромирование деталей из титанового сплава"*.
11. Илларионов А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: (Ечебное пособие). Изд-во Урал. ун-та, 2014. 137 с

References

1. <https://www.antonov.com/activity>
2. Sibileva, S. V., Karimova S. A. (2013). Surface treatment of titanium alloys for adhesion properties overview. *Aviatsionnyie materialyi i tehnologii*. Spetsvyipusk 2. S. 25—36 [in Russian].
3. Tsvikker, U. (1979). Titanium and its alloys. *Metallurgiya*. 512 s. [in Russian].
4. Bannikov, M. V., Oborin, V. A., Naymark, O. B. (2015). Investigation of the stages of fracture of titanium alloys in the regime of high- and high-cycle fatigue based on the morphology of the fracture surface. *Vestnik PNIPU. Mehanika*. # 3. S. 15—24 [in Russian].
5. Kollingz, E. V. (1988). Physical metallurgy of titanium alloys. *Metallurgiya*. 224 s. [in Russian].
6. Rechenko, D. S. (2008). High speed grinding of titanium and high temperature alloys. *Omskiy gosudarstvennyiye tehnikeskiy universitet*. S. 59—61 [in Russian].

7. Smyislov, A. M., Smyislova, M. K., Mingazhev, A. D., Selivanov, K. S. (2009). Multi-stage electrolytic-plasma processing of products made of titanium and titanium alloys. *Vesnik UGATU*. S. 141—145 [in Russian].
8. Valiev, R. R., Modina, Yu. M., Polyakov, A. V., Semenova, I. P., Zhernakov, V. S. (2016). Fatigue strength and fracture features of ultrafine-grained titanium alloy VT6. *Vesnik UGATU*. S. 11—16 [in Russian].
9. Podrezov, Yu. N., Danilenko, V. I. (2009). Analysis of the effect of repeated deformation on the mechanical behavior of titanium specimens deformed by screw extrusion. *Elektronnaya mikroskopiya i prochnost materialov: Sb. nauchn. tr. K.: IPM NAN Ukrainy, Vyp. 16*. S. 68—79 [in Russian].
10. Instruktsiya VIAM PI 1.2.089-78 “Chrome plating of titanium alloy parts” [in Russian].
11. Illarionov, A. G. (2014). Technological and operational properties of titanium alloys: a tutorial. *Izd-vo Ural. un-ta*, 137 s. [in Russian].

Effect of the chassis parts surface condition from high-strength titanium alloy VT-22 in the process of fatigue tests

Gorpenko A. O.^{1*}, Semenets O.I.¹, Doniy O. M.², Valuiska K. O.³

¹ ANTONOV COMPANY

*E-mail: timanz.ag@gmail.com

² National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

³ Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NASU

The research focuses on the influence of the surface condition on the resource of high-strength titanium alloy VT-22 landing gear details during fatigue tests. The tests were performed on special facilities that simulate the workload on a rod detail at the stage of extending and retraction of the landing gear. Fatigue tests were performed on four rods. Rods № 1-3 were destroyed at the lugs level, rod №4 withstood the entire cycle of loads, and was examined in an undamaged state. It was found that the cause of the failure of the rod №1 was axial play formation as a result of bracket lug deformation, which led to shock loads on the lug of the rod №1 during the tests. The destruction of the rod №2 could be caused by the shock axial loads due to changes in the characteristics and load values of the facility on the rod №2. The priority factor influencing the premature failure of the rod №3 was the high risks from surface machining in the most loaded part of the rod №3, namely at the R-junction of the cylindrical part to the lug. The presence of surface defects formed during the manufacturing stage, as well as the presence of deep scratches in the area with high load reduce the life of rod № 3 fivefold compared to the undamaged rod № 4, which had no visible surface defects. Surface damage detected in the non-chromized area of the rods can be eliminated by blasting with subsequent surface polishing, which will provide the required resource of the detail (rod № 4).

Keywords: high-strength titanium alloy VT-22, rod, fatigue tests, surface defects, structure of the surface layer.