

УДК 669.295; 621.78; 669.018.2

## ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ БОЛТІВ ЗІ СПЛАВУ VT22

О. М. ІВАСИШИН<sup>1</sup>, Є. Т. ВАСИЛЕВСЬКИЙ<sup>2</sup>, С. Л. АНТОНЮК<sup>2</sup>,  
В. В. ВЕЛИЧКО<sup>2</sup>, П. Є. МАРКОВСЬКИЙ<sup>1</sup>, І. М. ГАВРИШ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ;

<sup>2</sup> Державне підприємство “АНТОНОВ”, Київ

Швидкісною термічною обробкою та гарячим висаджуванням головок виготовлено дослідну партію стикувальних болтів М12 авіаційного призначення з прутків сплаву VT22, отриманих інтенсивною гарячою пластичною деформацією (кроковим куванням–вальцюванням). Після фінального старіння за випроб розтягом болти мали такі характеристики: границі текучості та міцності 1380 й 1455 МПа, відносне видовження та звуження 7,2 і 24,3% відповідно. Випробування, виконані за розробленою у ДП “АНТОНОВ” програмою, засвідчили, що втома та малоциклова втома майже удвічі вищі під час накочування різьблення в повністю термічно зміцненому стані, тобто після фінального старіння. Встановлено можливість підвищення втомних характеристик болтів вдосконаленням технології механічної обробки.

**Ключові слова:** титановий сплав VT22, високоміцні болти, механічні характеристики, інтенсивна гаряча пластична деформація, термічна обробка.

Титановим сплавам властиві унікальні властивості, перш за все – висока питома міцність. Їх переваги над сталевими аналогами проявляються під час використання у високоміцному стані у відповідальних виробках авіакосмічної техніки [1, 2]. Наприклад, замінюючи сталеві деталі роз’ємних з’єднань з міцністю не нижче 1400 МПа на титанові в літаку АН-124 “Руслан”, можна знизити його вагу щонайменше на 400 kg. Крім того, завдяки суттєво більшій їх корозійній тривалості збільшиться ресурс виробів та полегшаться ремонтні роботи. Сьогодні у літаках використовують роз’ємні з’єднання, виготовлені з титанових сплавів методом холодного висаджування, міцністю не вище 1100 МПа [3], оскільки не існувало промислової технології виробництва таких деталей з поліпшеними характеристиками. Але, застосовуючи до напівфабрикатів сплаву VT22 з певною вихідною мікроструктурою обов’язкове гартування у воді [4] та спеціальну швидкісну термічну обробку (ШТО) [5], можна виготовити болти з міцністю понад 1400 МПа, добре збалансовану з пластичністю. Нижче описано технологію виготовлення та випробування дослідної партії високоміцних стикувальних болтів М12 зі сплаву VT22 [6].

**Матеріал і методика.** Досліджували прутки сплаву довжиною 1,6 m та діаметром 18 mm, виготовлені методом крокового кування–вальцювання на підприємстві “Патон–Вірменія” [6]. Прутки піддавали ШТО за режимом, апробованим раніше [5]: нагрівання зі швидкістю 20°C/s до 900°C з подальшим гартуванням у воді. Обробляли резистивним методом, пропускаючи струм промислової частоти, на установці, розробленій в ІМФ НАН України. Далі прутки розрізали на заготовки завдовжки 180 mm та обточували до діаметра 13 mm і після швидкісного (індукційного) нагрівання з одного краю (середня швидкість 40°C/s, температура 750...780°C),

Контактна особа: П. Є. МАРКОВСЬКИЙ, e-mail: pmark@imp.kiev.ua

на горизонтально-кувальній машині формували головки болтів. Після цього заготовки розділяли на дві партії. Першу (партія № 1) піддавали старінню при 630°C упродовж 6 h, після чого виконували фінішну механічну обробку та накочували різьблення. Другу (партія № 2) спочатку механічно обробляли та накочували різьблення, а вже потім зістарювали за тим самим режимом. З кожної партії вибрали по три болти, з яких виточили зразки для типових випробувань на розтяг за стандартом ASTM E8. По 10 болтів з кожної партії випробовували на втому та малоциклово втому (МЦВ), застосовуючи розроблену в ДП “АНТОНОВ” “Програму випробувань гарячевисадних болтів з високоміцного титанового сплаву VT22” та спеціальне оснащення (рис. 1). Болти стискали та розтягували за симетричного циклу з максимальною амплітудою 19 та 29 kgf/mm<sup>2</sup> (втома та МЦВ відповідно). На різних стадіях обробки вибирали заготовки, щоб вивчити мікроструктуру (світлова мікроскопія – СМ) та фазовий склад (рентгівський аналіз – XRD). Після втомних випробувань злами болтів вивчали за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (СЕМ).

**Результати та їх обговорення.** Інтенсивна пластична деформація під час крокового кування–вальцювання за порівняно невисоких температур призводить до формування специфічного структурно-фазового стану сплаву [7, 8]. Це проявляється ось у чому. Завдяки унікальному поєднанню температури та швидкості деформації, на відміну від звичайної (відносно повільної) термомеханічної обробки [3], не встигають розвинути процеси рекристалізації, а отже, не трансформуються вихідна зеренна та внутрішньозеренна пластинчаста мікроструктури. Напруження, викликані пластичною деформацією, релаксують не шляхом рекристалізації, а розворотом кристалічної ґратки в межах вихідних зерен, які дещо змінюють свою форму на видовжену в напрямку основної течії металу [7, 8]. Внаслідок цього виникає надзвичайно “гостра” кристалографічна текстура аксіального типу, яка через вклад анізотропії дещо компенсує недоліки в будові мікроструктури, підвищуючи механічні характеристики матеріалу.

Рис. 2. Результати втомних випробувань болтів зі сплаву VT22: 1, 2 – партії № 1 і 2.

Fig. 2. Fatigue tests data of bolts from VT22 alloy: 1, 2 – batches № 1 and 2.

Після ШТО та фінального старіння випробуваннями на розтяг зразків, вирізаних з готових болтів, виявили такі результати: границя текучості 1380 МПа, границя міцності 1455 МПа, відносні видовження та звуження 7,2 і 24,3%, що повністю відповідає поставленій меті.

Встановили (рис. 2), що до втоми, і до МЦВ схильніші болти партії № 1, в

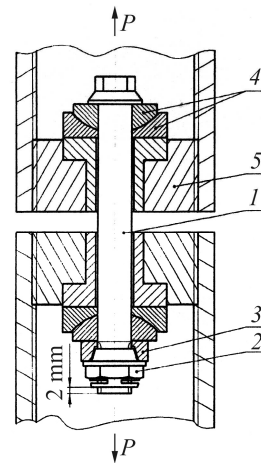
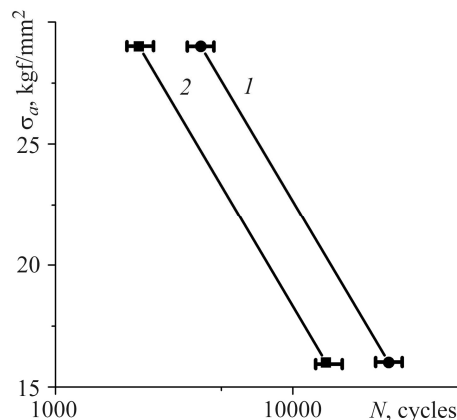


Рис. 1. Схема встановлення болтів:  
1 – болт; 2 – гайка;  
3 – шайба; 4 – сферична шайба; 5 – оснащення.

Fig. 1. Positioning of bolts: 1 – bolt; 2 – nut; 3 – spacer; 4 – spherical spacer; 5 – rigging (schematically).



якій різьблення накочували у термічно зміцненому стані. Зокрема, за МЦВ маємо 4103 проти 2251 циклів, а за втоми – 25360 проти 13808 циклів, тобто середні значення перевищують майже удвічі. Інша принципова відмінність партій № 1 і 2 у тому, що в першому випадку руйнування відбувалося по гальтельному переходу під головками, а в другому – у перших двох витках різьблення (що є типовим для болтів). Тобто у першій партії внаслідок накочування різьблення навіть менша за діаметром ділянка виявилася міцнішою, ніж у товщому місці переходу до головки болта. Отже, різьблення додатково зміцнює і його слід наносити після всіх видів термообробки.

Для фактографічних досліджень з обох партій відібрали болти, які витримали найменшу та найбільшу кількість циклів навантаження за МЦВ та втоми (рис. 3). Спільним тут було те, що одночасно по зовнішній поверхні всіх болтів утворювалося багато джерел тріщин. Порівняльний аналіз виявив, що принципової різниці в будові зламів болтів партії № 2 немає. Водночас є деяка відмінність у руйнуванні болтів, випробуваних на втоми (низькі навантаження) та МЦВ (вищі). У першому випадку джерела зародження втомних тріщин виникали лише на частині периметру різьблення, а загальна площа зламу приблизно навіпіл поділена між зоною пришвидшеного розповсюдження втомних тріщин та зоною статичного руйнування. У другому випадку тріщини утворювалися по всьому периметру, а площа зони статичного руйнування суттєво переважала площу зони пришвидшеного розповсюдження втомних тріщин.

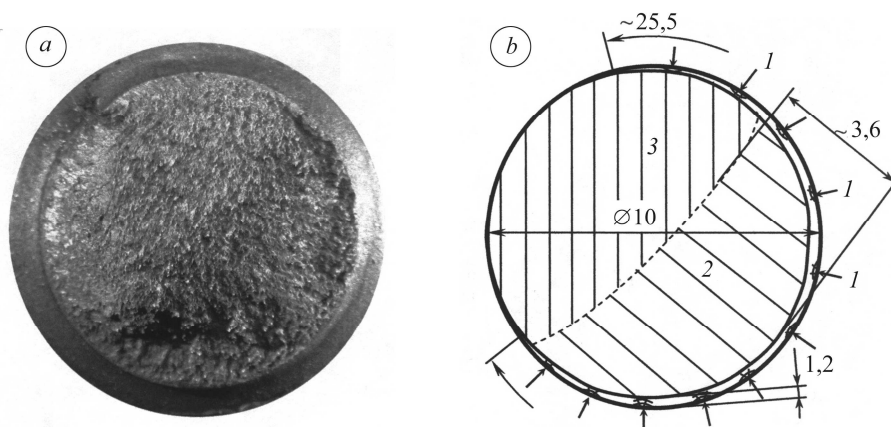


Рис. 3. Типовий загальний вигляд (а) та схема (б) зламів болтів після втомних випробувань: 1 – джерело зародження втомної тріщини; 2 – зона пришвидшеної втоми; 3 – зона статичного руйнування (доламу).

Fig. 3. Typical common view (a) and scheme (b) of bolts fracture surfaces after fatigue testing: 1 – source of fatigue crack nucleation; 2 – zone of accelerated fatigue; 3 – zone of static fracture (rupture area).

Переважальну частину (понад 80%) зламу болта партії № 1 з накоченим після термічної обробки різьбленням, що витримав найменшу кількість циклів під високими навантаженнями (випроба на МЦВ), займала ділянка пришвидшеного розповсюдження втомних тріщин, тоді як у зламі такого ж болта, який витримав найбільшу кількість циклів, вона не перевищувала 50% загальної площі за ~30...35% зони втоми. Крім того, тут втомні тріщини зароджувалися переважно з одного краю, а ділянка втоми була відносно невеликою (рис. 4).

Під час руйнування болтів по різьбленню (партія № 2, накочування різьблення до старіння, випробування на МЦВ) втомні тріщини зароджувалися на приповерхневих ділянках і мали типовий борозенчастий рельєф (рис. 4а), що

свідчить про їх поступовий ріст зі збільшенням циклів навантаження. Для болтів партії № 1, в яких різьблення накочували після термічного зміцнення (руйнування по галтельному переходу), під час випробувань на МЦВ втомні тріщини виникали також у приповерхневих шарах і ділянки їх початкового росту мали таку ж саму будову (рис. 4*b*). Як видно з поверхонь руйнування болтів партії № 1, випробуваних на втому (руйнування по різьбленню), зонам зародження та росту втомних тріщин також притаманний борозенчастий мікрорельєф (рис. 4*c*), а зоні доламування – в'язкий ямковий (рис. 4*d*). Болти партій № 1 та 2, випробувані на втому, виявилися найстійкішими (витримали максимальну кількість циклів) (рис. 4*e, f*). Отже, характер зародження втомних тріщин не залежить ані від місця їх утворення (різьблення чи галтельний перехід), ані від часу старіння. Таким чином, незалежно від номера партії, виду випробувань та рівня навантаження характер руйнування всіх болтів винятково в'язкий, а відмінності полягали лише у співвідношенні складників поверхонь зламів.

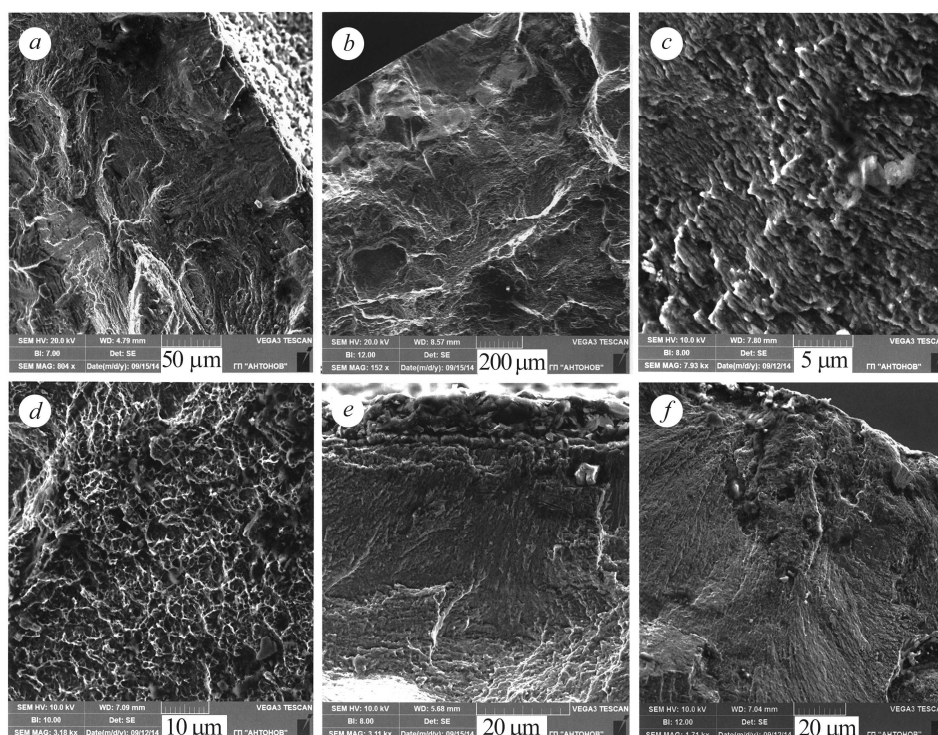


Рис. 4. Поверхня зламів болтів після випробувань на малоциклову втому (*a, b, e, f*) та втому (*c, d*). СЕМ.

Fig. 4. Fracture surfaces of bolts after low-cycle fatigue (*a, b, e, f*) and fatigue (*c, d*) testing. Bolts of batches: (*a, c, d, e*) – № 1; (*b, f*) – № 2. SEM.

Оскільки заготовки № 1 руйнувалися не по різьбленню, як зазвичай болти, додатково досліджували мікроструктуру у двох зонах – на різьбленні та на галтельному переході. На ділянці болта в зоні різьблення (рис. 5*a*) добре видно, що під час накочування напрямок волокон мікроструктури повторював конфігурацію деталі, тому не сприяв зародженню втомної тріщини. Інша ситуація в болтах у зоні галтельного переходу (рис. 5*b*), де напрямок волокон мікроструктури не відповідає конфігурації деталі. Іншими словами, у місці радіусного переходу (галтелі) спостерігається “перерізання” волокон, які не спрямовані паралельно до поверхні деталі, а виходять на неї, що, вочевидь, сприятиме як утворенню, так і відносно швидкому розповсюдженню тріщин, що рухаються вздовж цих розвер-

нутих перпендикулярно до поверхні волокон. Мікротвердість в місці радіусного переходу на різній відстані – від 10  $\mu\text{m}$  від краю поверхні до 1000  $\mu\text{m}$  – становила  $\sim 3,5$  МПа (за навантаження 0,49 N). Отже, приповерхневий шар тут не зміцнений, тоді як під час накочування різьблення ця ділянка нагартowana до твердості понад 4,2 GPa. Таким чином, вдосконалюючи механічну обробку (обточування) і застосовуючи в місці радіусних переходів болтів додаткову зміцнювальну обробку (наприклад, механічне нагартування), можна ще більше поліпшити втомні характеристики.

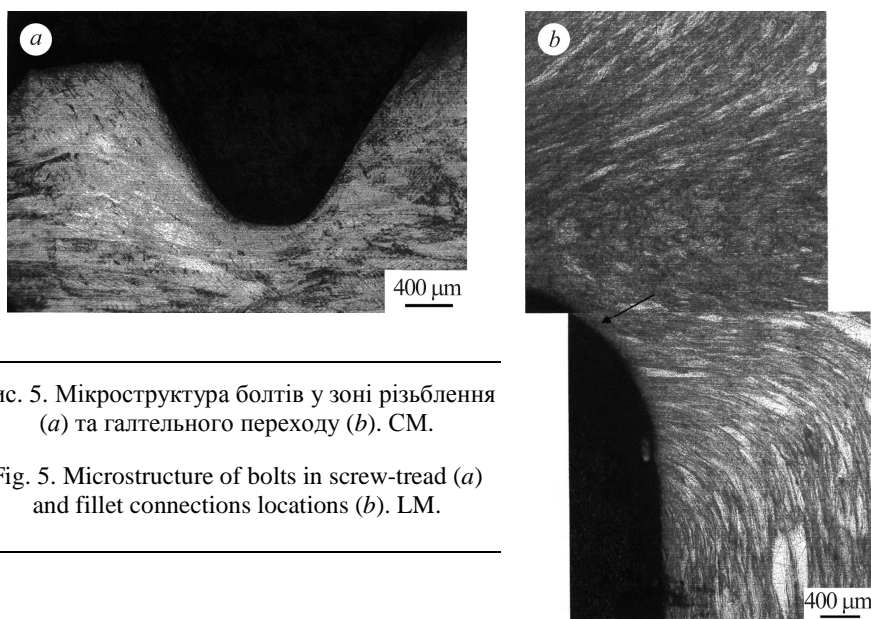


Рис. 5. Мікроструктура болтів у зоні різьблення (a) та галтельного переходу (b). СМ.

Fig. 5. Microstructure of bolts in screw-tread (a) and fillet connections locations (b). LM.

## ВИСНОВКИ

Виготовлені за розробленою технологією дослідні титанові болти зі сплаву BT22 поєднують високі статичну міцність ( $\sigma_B > 1450$  МПа) і пластичність ( $\delta > 7\%$ ,  $\psi > 24\%$ ), а також задовільні втомні характеристики. Найкращими втомними властивостями володіли болти після накочування різьблення в повністю термообробленому (термічно зміцненому) стані. Під час дослідження їх зламів та мікроструктури встановили, що, вдосконалюючи технологію виготовлення на етапі фінішної обробки, можна додатково поліпшити втомні властивості.

*РЕЗЮМЕ.* С использованием скоростной термической обработки и горячей высадки головок изготовлена опытная партия стыковочных болтов М12 авиационного назначения из прутков сплава BT22, полученных интенсивной горячей пластической деформацией (шаговой ковкой–прокаткой). После заключительного старения при испытаниях на растяжение болты имели такие характеристики: пределы текучести и прочности 1380 и 1455 МПа, относительные удлинение и сужение 7,2 и 24,3% соответственно. Испытания, проведенные по разработанной ГП “АНТОНОВ” программе, показали, что усталость и малоцикловая усталость повышаются почти в два раза, когда резьбу накатывали в полностью термически упрочненном состоянии, т.е. после старения. Сделан вывод о возможности повышения усталостных характеристик болтов при усовершенствовании технологии заключительной механической обработки.

*SUMMARY.* The experimental batch of connecting bolts M12 for aerospace application was produced employing rapid heat treatment and hot plastic deformation (forging–rolling). As initial material the BT22 rods were used. After final ageing, these bolts were characterized by following properties: yield strength 1380 МПа, tensile strength 1455 МПа, relative elongation 7.2%, reduction in area 24.3%. Fatigue testing was performed according to the developed in SE

“ANTONOV” testing program and showed that fatigue limits became approximately two times higher in case of thread rolling after final ageing, i.e. in heat strengthened condition. The conclusion about possible improvement of fatigue characteristic after optimization of technological processes of final mechanical treatment was done.

1. *A comparative study of the mechanical properties of high-strength beta-titanium alloys* / O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. V. Matviychuk et al. // *J. Alloys and Compounds*. – 2008. – **457**, № 1–2. – P. 296–309.
2. *Ageing response of coarse- and fine-grained beta-titanium alloys* / O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, S. L. Semiatin, C. H. Ward // *Mat. Sci. & Eng. A*. – 2005. – **405**, № 1–2. – P. 296–305.
3. *Глазунов С. Г., Мусеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы*. – М.: Металлургия, 1969. – 348 с.
4. *Вплив швидкості охолодження під час гартування на старіння і формування механічних характеристик титанового сплаву VT22* / О. М. Івасишин, П. Є. Марковський, І. М. Гавриш, О. П. Карасевська // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 1. – С. 60–66. (*Ivasyshyn O. M., Markov'skyi P. E., Havrysh I. M., and Karasevs'ka O. P. Influence of cooling rate in the process of Hardening on the aging and formation of the mechanical characteristics of VT22 titanium alloy* // *Materials Science*. – 2014. – **50**, № 1. – P. 62–69.)
5. *Высокопрочный титановый крепеж из сплава VT22* / О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, А. Г. Моляр и др. // Сб. тр. X Междунар. конф. “Ti–2012 в СНГ” (22–25 апреля 2012 г., Казань, Россия). – К.: РИО ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, 2012. – С. 39–44.
6. *Оптимизация механических свойств прутковых полуфабрикатов из сплава VT22 специальной термомеханической обработкой* / О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, А. Г. Моляр и др. // Там же. – С. 102–107.
7. *Effect of severe hot forging and rolling on microstructure, texture and tensile properties of titanium metastable beta-alloys* / O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, M. Pozuelo, S. V. Prikhodko // *Proc. of the ASME 2013 Int. Mech. Engng. Congress and Exposition IMECE13*, (Nov. 15–21, 2013, San Diego, California, USA). – IMECE2013-63767. – 10 p.
8. *Unique recrystallization resistance of titanium metastable  $\beta$ -alloys under severe hot deformation* / O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, M. Pozuelo, S. V. Prikhodko // *Microscopy and Microanalysis*. – 2013. – **19**, Supp. S2. – P. 1776–1777.

Одержано 03.01.2015