

РЕАКТОРНОЕ И АВИАКОСМИЧЕСКОЕ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

PACSnumbers: 46.50.+a, 62.20.fk, 62.20.mj, 62.20.mm, 81.40.Ef, 81.40.Jj, 81.40.Np

Формирование оптимальной конструкционной прочности авиационных крепёжных болтов из титановых сплавов

О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03142 Киев, Украина*

Разработана методология формирования оптимальной конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}}$ авиационных крепёжных болтов из титановых сплавов с целью сбалансированности сочетания свойств прочности и пластичности путём рационального подбора комплекса их базовых механических характеристик: условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_B , относительного сужения в момент разрушения образца ψ_K . Установлено, что величину конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}}$ авиационных крепёжных болтов из титановых сплавов формируют базовые механические характеристики $\sigma_{0,2}$, σ_B и ψ_K , а также показатель истинного напряжения в момент разрушения образца S_K при испытаниях на одноосное растяжение. Показано, что с целью повышения величины конструкционной прочности авиационных крепёжных болтов из титановых сплавов до требуемого уровня $\tau_{\text{ср.}} \cong 850$ МПа усилия технологов должны быть направлены на увеличение уровня параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ и снижение величины показателя деформационного упрочнения n перспективных титановых сплавов. Условия формирования такого комплекса свойств позволяют не только целенаправленно формировать наилучшие значения $\tau_{\text{ср.}}$, но и давать обоснованную прогнозную оценку возможности дальнейшего повышения этого показателя.

Ключевые слова: крепёжные болты, титановые сплавы, конструкцион-

Corresponding author: Artur Vitaliyovych Shiyani
E-mail: shiyani_av@ukr.net

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. Ya. Meshkov, and A. V. Shiyani, Formation of Optimum Structural Strength of Aviation Fastening Bolts from Titanium Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 9: 1197–1211 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.09.1197.

ная прочность, охрупчивание, оптимизация механических свойств.

Розроблено методологію формування оптимальної конструкційної міцності τ_{cp} , авіаційних кріпильних прогоничів з титанових стопів з метою збалансованості поєднання властивостей міцності та пластичності шляхом раціонального підбору комплексу їхніх базових механічних характеристик: умовної межі плинності $\sigma_{0,2}$, границі міцності σ_B , відносного звуження в момент руйнування зразка ψ_K . Встановлено, що величину конструкційної міцності τ_{cp} авіаційних кріпильних прогоничів з титанових стопів формують базові механічні характеристики $\sigma_{0,2}$, σ_B і ψ_K , а також показник істинного напруження в момент руйнування зразка S_K при випробуваннях на одновісний розтяг. Показано, що з метою підвищення величини конструкційної міцності авіаційних кріпильних прогоничів з титанових стопів до потрібного рівня $\tau_{cp} \cong 850$ МПа зусилля технологів мають бути спрямовані на збільшення рівня параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ та зниження величини показника деформаційного зміцнення n перспективних титанових стопів. Умови формування такого комплексу властивостей уможливають не тільки цілеспрямовано формувати найліпші значення τ_{cp} , але й давати обґрунтовану прогностичну оцінку можливості подальшого підвищення цього показника.

Ключові слова: кріпильні прогоничи, титанові стопи, конструкційна міцність, окрихчення, оптимізація механічних властивостей.

A methodology of formation of the optimal structural strength τ_{slice} is developed. Aviation fastening bolts made from titanium alloys for the purpose of balance of the combination of strength and plasticity properties by rational selection of a set of their basic mechanical characteristics, *i.e.*, the conditional yield strength σ_Y , the ultimate tensile strength σ_S , and the relative reduction in area ψ at the moment of sample destruction. As determined, the value of the structural strength τ_{slice} of aviation fastening bolts made from titanium alloys is formed by these basic mechanical characteristics, σ_Y , σ_S , and ψ , as well as by the true fracture stress S_f under uniaxial tension tests. As shown, in order to increase the structural strength of aviation fastening bolts made from titanium alloys up to the required level of $\tau_{slice} \cong 850$ МПа, technologists' efforts must be aimed to increase the level of parameter σ_Y/σ_S and to reduce the strain hardening exponent n for advanced titanium alloys. The formation conditions for such a complex of properties make possible not only to form the best values of τ_{slice} purposefully, but also to give a justified forecast estimation of the possibility of further increase of this parameter.

Key words: fastening bolts, titanium alloys, structural strength, embrittlement, optimization of mechanical properties.

(Получено 26 июля 2017 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

По комплексу физико-механических свойств конструкционные титановые сплавы (КТС) являются универсальными и используются в

различных видах ответственной техники. При этом эффективность использования КТС и их сварных соединений в большинстве случаев можно повысить выбором оптимального химического состава, методами термической (ТО) и термомеханической (ТМО) обработок.

На практике важна оценка критических параметров охрупчивания крепёжных болтов из КТС, которые используются в авиационной и космической технике. Таким образом, поиск рациональной величины их конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}}$, полученной по результатам испытаний этих изделий на двойной срез [1], является актуальной задачей, учитывая тенденцию к замене стальных крепёжных болтов на титановые [2]. Здесь понятие «конструкционной прочности» используется по отношению к напряжению разрушения $\tau_{\text{ср.}}$ — количественной характеристике несущей способности крепёжных болтов, которые в данном случае являются элементами эксплуатируемой конструкции [3].

Замена стальных крепёжных болтов на титановые в авиационной технике связана с тем, что крепёжные болты из КТС после ТО на уровень предела прочности $\sigma_B = 1100$ МПа имеют такие же свойства при растяжении, как и болты из легированных конструкционных сталей (КС). При этом титановые болты на 40% легче стальных [4]. Кроме того, болты из КТС имеют следующие дополнительные преимущества: их упругое удлинение при одних и тех же напряжениях нагружения почти в 2 раза больше, чем у болтов из КС, а вследствие более высокой податливости болтов из КТС дополнительное нагружение на них снижается также почти в 2 раза при условии эксплуатации в стальных узлах, однако эти преимущества исчезают при их работе в титановых узлах; болты из КТС малочувствительны к перекосу опорных поверхностей при статическом нагружении и не имеют склонности к замедленному хрупкому разрушению [4]. Так, проведённый в [4] сравнительный анализ величин характеристик нагружения при разрушении титановых болтов (на примере сплавов ОТ4-1, ВТ14, ВТ14 (отжиг) и ВТ16) и болтов из легированных КС (на примере сталей 30ХГСА, 38ХА и 40Х2НМА), показал почти полную идентичность этих показателей как при испытаниях на растяжение, так и при испытаниях на срез.

Опыт показывает, что повышение конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}}$ крепёжных болтов из КТС путём увеличения только показателей исходной прочности $\sigma_{0,2}$ металла оказывается бесперспективной задачей, так как на определённом этапе достигается порог ($\sigma_{0,2} \cong 1125$ МПа), за которым следует снижение (рис. 1, кривая 1) или стабилизация (рис. 1, кривая 2) уровня $\tau_{\text{ср.}}$, что, очевидно, следует связать с недостатком пластических свойств таких высокопрочных сплавов.

Однако, улучшая структуру сплавов и, соответственно, комплекс механических свойств [5], указанный порог можно сгладить и сдвинуть в сторону более высоких значений прочности $\sigma_{0,2}$, но необ-

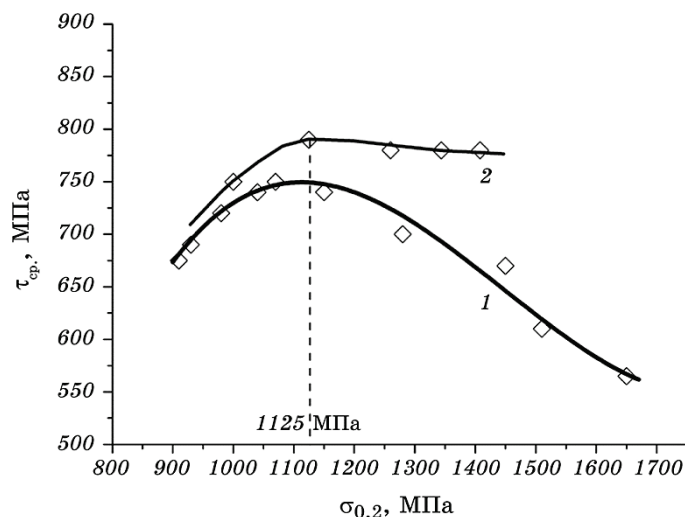


Рис. 1. Зависимости конструкционной прочности $\tau_{ср}$ от увеличения исходной прочности $\sigma_{0,2}$ КТС: 1 — кривая снижения $\tau_{ср}$, 2 — кривая стабилизации $\tau_{ср}$, \diamond — экспериментальные данные, полученные в лабораториях ГП «Антонов» и др.

Fig. 1. Dependence of structural strength τ_{slice} on the increase of an initial strength σ_Y of structural titanium alloy (STA): 1—curve of the τ_{slice} reduction, 2—curve of the τ_{slice} stabilization, \diamond —experimental data obtained in the laboratories of the ‘Antonov’ Company and others.

ходимость дальнейшего увеличения конструкционной прочности крепёжных болтов из КТС вплоть до значения $\tau_{ср} \cong 850$ МПа требует установления ключевого фактора, ответственного за снижение $\tau_{ср}$ в области прочностей, превышающих $\sigma_{0,2} \cong 1100$ – 1200 МПа (рис. 1). Очевидно, что этот фактор определённым образом связан со свойством пластичности металла.

В связи с этим, целью настоящей работы является поиск способов формирования рациональной конструкционной прочности $\tau_{ср}$ авиационных крепёжных болтов из титановых сплавов на основе сбалансированного сочетания свойств прочности и пластичности путём оптимизации комплекса их базовых механических характеристик — условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_B и относительного сужения в момент разрушения образца ψ_K , которые всегда входят в протоколы испытаний КТС на одноосное растяжение и легко определяются в условиях заводской или научной лаборатории.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При проектировании резьбовых соединений обязательно следует

учитывать распределение напряжений во впадинах резьбы. Анализ, проведённый в [4, 6], показал, что в таких впадинах наблюдается существенная концентрация напряжений, максимальный уровень которой действует в первом от опорного торца гайки рабочем витке резьбы болта (болт с концентратором напряжений (КН) в виде резьбы). Это связано со сложными условиями напряжённо-деформированного состояния (НДС) в этой области, которые формируются на основе взаимного влияния концентрации изгибных напряжений витка резьбы и общего поля напряжений растяжения. Исходя из таких условий нагружения, максимальную величину теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ [7] в резьбовом соединении авторы [4, 6] определяют для наиболее нагружённого первого витка резьбы (максимальное напряжение $\sigma_{H \max} = 54,5$ МПа) при радиусе её впадины $R = 0,108t$ (где t — шаг резьбы). При этом $\alpha_\sigma = 4,64$, а для следующих витков резьбы значения α_σ уменьшаются при наличии свободных витков или при увеличении шага и радиуса впадин, а также почти не зависят от её размера [4, 6]. По данным [6] указанная величина коэффициента α_σ значительно больше, чем его значение в закруглении под головкой крепёжного болта (болт с КН в виде головки) при её контакте с жёсткой деталью, когда максимальная величина составляет $\alpha_\sigma \cong 3,5$ при $R/d = 0,05$ (где R — радиус закругления под головкой, d — внешний диаметр болта) и уменьшается при увеличении R , а также при контакте головки болта с упругой деталью. Из сказанного следует, что для дальнейших исследований целесообразно принимать максимальное значение $\alpha_\sigma = 4,64$, с учётом того, что оно, в зависимости от характера распределения давления вдоль рабочих поверхностей витков резьбы и внешнего нагружения, варьируется в пределах 3–7% [4, 6].

Фактор концентрации напряжений в резьбовых соединениях проявляется в виде потери конструкционной прочности изделия ($\tau_{ср.}$) в случае недостаточно высокой восприимчивости материала к неизбежному появлению в нем зон локальной пластичности, чреватых зарождением очагов разрушения. В этой связи для анализа проблемы высокой конструкционной прочности изделия с КН логично в дополнение к традиционным показателям базовых механических свойств ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K) привлечь характеристику истинного напряжения в момент разрушения образца при растяжении S_K , в которой неявно отражается действие такого важного фактора механических свойств металла, как показатель деформационного упрочнения n [8], а величина соотношения $S_K/\sigma_{0,2}$ прямо выражает меру особого прочностного резерва у материала, позволяющего ему надёжно выдерживать силовую деформационную перегрузку выше предела текучести $\sigma_{0,2}$ в условиях одноосного растяжения. По своему смыслу отношение $S_K/\sigma_{0,2}$ можно отнести к категории характе-

ристик особых механических свойств конструкционного материала, ответственных за деформационный резерв прочности, играющий важную роль в сохранении несущей способности нагруженного изделия (σ_{NF}), в котором имеются локальные неоднородности НДС. Роль величины $S_K/\sigma_{0,2}$ в оптимизации несущей способности изделия с КН подробно исследовалась в работе [3].

3. МАТЕРИАЛЫ

В настоящей работе в качестве объектов исследований были взяты следующие высокопрочные сплавы: Ti-3Al-5Mo-5V-3Cr-0,5Fe, его новая модификация VST 3553, а также VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe), как широко используемый в настоящее время в авиационной промышленности. Различные варианты сочетаний прочностных и пластических свойств задавались разными видами ТМО и ТО, детальная информация о которых приведена в [2, 9–12].

С целью определения наилучшей (оптимальной) конструкционной прочности τ_{cp} экспериментальных авиационных крепёжных болтов из КТС использовали сплавы, изготовленные с применением различных технологий. Экспериментальные данные конструкционной прочности $\tau_{cp}^{акс}$ болтов, базовых механических характеристик используемых сплавов, режимов их ТО и некоторых показателей, необходимых для разработки способа формирования оптимальной конструкционной прочности, приведены в табл. 1.

Приведённые в таблице 1 данные базовых механических характеристик и параметра S_K , исследуемых в настоящей работе КТС, получены в Институте металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины (ИМФ) [9, 10], а значения показателей деформационного упрочнения n этих сплавов рассчитаны по методике [13, 14].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из таблицы 1 видно, что экспериментальный сплав Ti-3Al-5Mo-5V-3Cr-0,5Fe имеет конструкционную прочность на двойной срез τ_{cp} , величина которой не превышает 800 МПа, а это ниже оптимального (наилучшего) значения этого показателя $\tau_{cp} \cong 850$ МПа для современных стальных болтов, которые используются в авиационной и космической технике.

Примечательно, что наивысшую конструкционную прочность τ_{cp} (строки 6–9 в табл. 1) имеют сплавы, у которых существенно понижены показатели пластичности ($\psi_K \leq 40,5\%$), но повышены показатели истинного напряжения разрушения ($S_K \geq 1385$ МПа), а также, что особенно важно, понижено отношение $S_K/\sigma_{0,2} \leq 1,10$.

В работе [3] была отмечена определяющая роль отношения

ТАБЛИЦА 1. Экспериментальные данные конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}}^{\text{экс.}}$, базовых механических характеристик используемых сплавов, режимов их ТО и некоторых показателей для формирования оптимальной конструкционной прочности крепежных болтов из КТС (СТО — скоростная термическая обработка, ПО — печное охлаждение).

TABLE 1. Experimental data of structural strength $\tau_{\text{slice}}^{\text{exp.}}$, basic mechanical characteristics of used alloys, their regimes of a heat treatment and some indicators for the formation of an optimal structural strength of fixing bolts from structural titanium alloy (STA) ('СТО'—high-speed heat treatment, 'ПО'—furnace cooling).

№*	$\tau_{\text{ср.}}^{\text{экс.}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ_K , %	S_K , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$S_K/\sigma_{0,2}$	n
1	727	1190	1265	58,0	1335	0,94	1,12	0,038
2	735	1220	1290	62,0	1370	0,95	1,12	0,036
3	734	1120	1185	65,0	1265	0,95	1,13	0,036
4	730	1155	1215	66,0	1295	0,95	1,12	0,034
5	692	1040	1075	71,0	1155	0,97	1,11	0,025
6	790	1275	1340	40,5	1385	0,95	1,09	0,032
7	790	1260	1340	40,0	1385	0,94	1,10	0,038
8	800	1320	1430	17,0	1430	0,92	1,08	0,041
9	800	1370	1435	21,3	1445	0,95	1,05	0,030

*Сплав Ti-3Al-5Mo-5V-3Cr-0,5Fe (новая модификация (new modification) — VST 3553) [9, 10]: №№ 1-5 — состояние поставки (as-received condition); №№ 6, 7 — СТО 20 К·с⁻¹, 900°C, ПО + 560°C, 8 ч; №№ 8, 9 — СТО 20 К·с⁻¹, 950°C, ПО + 560°C, 8 ч.

$S_K/\sigma_{0,2}$, как деформационного резерва прочности металла в его влиянии на конструкционную прочность изделия, содержащего КН.

Наивысшую несущую способность (σ_{NF}) образцов с кольцевым надрезом дают сплавы с прочностью $\sigma_{0,2}$, критически близкой к показателю S_K для данного вида КН [3]. Очевидно, что избыток пластичности, как и излишне высокий резерв прочности не реализуются в локальной зоне пластичности под концентратором (в случае болтов — впадина резьбы или закругление под головкой) во всей полноте, отчего конструкционная прочность (σ_{NF} или $\tau_{\text{ср.}}$) не достигает возможного максимума. У каждого вида КН со свойственным ему коэффициентом α_σ имеется своё критическое значение показателя $S_K/\sigma_{0,2}$, отвечающее максимальной конструкционной прочности σ_{NF} или $\tau_{\text{ср.}}$ для данного уровня $\sigma_{0,2}$. Но с увеличением $\sigma_{0,2}$ сплава это критическое значение показателя $S_K/\sigma_{0,2}$ немного понижается [3].

На рисунке 2 видно, что проанализированные нами сплавы образуют следующую зависимость между показателями S_K и $\tau_{\text{ср.}}$:

$$\tau_{\text{ср.}} = a + bS_K - cS_K^2, \quad (1)$$

где $a = (206,60 \pm 9,81)$ МПа, $b = (0,56 \pm 0,05)$, $c = (1,00 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹ — эмпирические коэффициенты.

Из рисунка 2 следует, что для перспективных КТС, которые согласно расчёту достигают величины $\tau_{\text{ср.}} = 850$ МПа за счёт формирования рационального комплекса механических свойств согласно зависимости (1), значения истинного напряжения в момент разру-

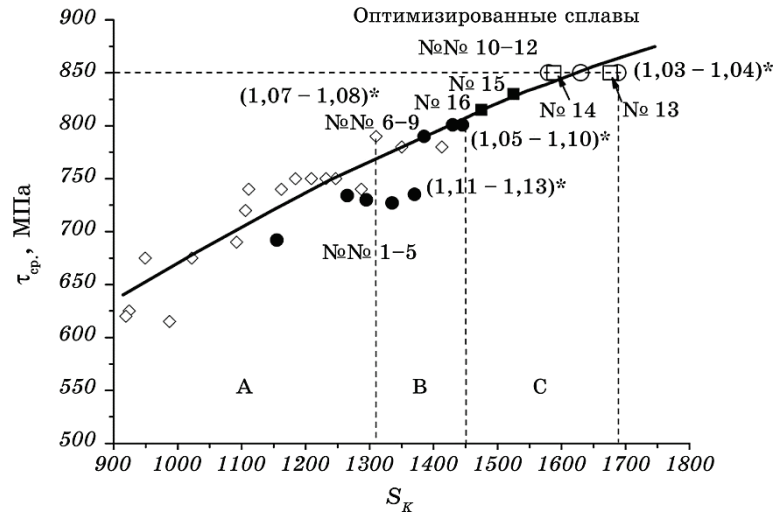


Рис. 2. Зависимость конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}}$ от истинного напряжения S_K в момент разрушения гладкого образца при растяжении: • — №№ 1–9 в табл. 1; ○ — №№ 10–12 в табл. 2 — оптимизированные по (1), □ — №№ 13, 14 в табл. 2 — оптимальные из банка данных ИМФ; ■ — №№ 15, 16 в табл. 2 — наивысшие показатели $\tau_{\text{ср.}}$ для сплава ВТ22, полученные в ИМФ [11] и в ГП «Антонов» [12]; ◇ — экспериментальные данные, полученные в лабораториях ГП «Антонов» и др.; А — область низких значений $\tau_{\text{ср.}}$; В — область повышенных значений $\tau_{\text{ср.}}$ по данным ИМФ и ГП «Антонов»; С — область перспективных оптимальных значений $\tau_{\text{ср.}}$; * — интервалы изменения показателя $S_K/\sigma_{0,2}$ по данным табл. 1, 2.

Fig. 2. Dependence of structural strength τ_{slice} on the true stress S_f at the moment of fracture of a smooth specimen under tension: •—Nos. 1–9 from Table 1; ○—Nos. 10–12 from Table 2—optimized by (1); □—Nos. 13, 14 from Table 2—optimal from the of IMPh–NASU data bank; ■—Nos. 15, 16 from Table 2—the highest values of τ_{slice} for the alloy ВТ22 obtained in the IMPh–NASU [11] and in the ‘Antonov’ Co. [12]; ◇—experimental data obtained in the laboratories of the ‘Antonov’ Co. and others; А—region of τ_{slice} low values; В—area of increased τ_{slice} values according to the IMPh–NASU and ‘Antonov’ Co. data; С—region of prospective optimal τ_{slice} values; *—intervals of parameter S_f/σ_Y changing according to data from Tables 1, 2.

шения гладкого образца при растяжении должны находиться в интервале $S_K = 1580\text{--}1690$ МПа.

Значения базовых механических характеристик и других характерных показателей оптимальных (наилучших) КТС для крепёжных болтов с прогнозированной согласно зависимости (1) конструкционной прочностью $\tau_{\text{ср.}} \cong 850$ МПа, а также наивысшие показатели $\tau_{\text{ср.}}$ для сплава ВТ22, полученные в ИМФ [14] и в ГП «Антонов» [15], представлены в табл. 2.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В анализе закономерностей влияния комплекса механических свойств на уровень конструкционной прочности несущего элемента болтового соединения $\tau_{\text{ср.}}$ в настоящей работе к традиционным базовым характеристикам ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K) нами дополнительно были привлечены показатели S_K и $S_K/\sigma_{0,2}$ на том основании, что разрушение

ТАБЛИЦА 2. Значения $\tau_{\text{ср.}}$, базовых механических характеристик и других показателей высокопрочных КТС, оптимизированных для уровня конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}} = 850$ МПа, а также наивысшие показатели $\tau_{\text{ср.}}$ для сплава ВТ22, полученные в ИМФ [11] и в ГП «Антонов» [12] (CD — холоднодеформированный, ЗВ — закалка в воду).

TABLE 2. The data of τ_{slice} , the basic mechanical characteristics and other indices of high-strength STA optimized for the level of structural strength $\tau_{\text{slice}} = 850$ МПа, as well as the highest values of τ_{slice} for the alloy ВТ22 obtained in the IМPh–NASU [11] and in the ‘Antonov’ Co. [12] (CD—cold-deformed, ‘ЗВ’—water quenched).

№	$\tau_{\text{ср.}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ_K , %	S_K , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$S_K/\sigma_{0,2}$	n
Оптимальные перспективные сплавы по (1) и [14, 15]								
10	850	1525	1545	23,0	1580	0,99	1,04	0,014
11	850	1575	1600	19,2	1630	0,98	1,03	0,015
12	850	1640	1665	15,5	1690	0,98	1,03	0,015
Сплав Ti–3Al–14Mo–3,5Nb (№ 13 — скоростная полигонизация, 520°C, 8 ч; № 14 — CD, скоростная рекристаллизация 880°C, ЗВ, 10 ч) в оптимальном состоянии (из банка данных ИМФ)								
13	850	1630	1655	14,3	1675	0,98	1,03	0,015
14	850	1540	1555	23,0	1590	0,99	1,03	0,011
Сплав ВТ22 (№ 15 — прокатка + СТО 20 К·с ⁻¹ , 920°C, ЗВ + 620°C, 7 ч [11]; № 16 — ТМО + СТО 20 К·с ⁻¹ , 920°C, ЗВ + 620°C, 7 ч [12])								
15	830	1410	1495	29,0	1525	0,94	1,08	0,037
16	815	1380	1455	24,3	1475	0,95	1,07	0,033

стержней, содержащих КН в виде резьбовой нарезки ($\alpha_\sigma \cong 3,5-4,7$), безусловно, инициируется в зонах локальной пластичности во впадинах резьбы (КН — резьба) или в закруглениях под головкой болта (КН — головка), где в результате исчерпания деформационных резервов прочности ($S_K/\sigma_{0,2}$) наступает рубеж предельного состояния, т.е. реализуется разрушение изделия с КН.

Следует отметить, что сплав Ti-3Al-14Mo-3,5Nb из банка данных КТС, сформированного в ИМФ, по соотношениям своих базовых свойств ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K) в обоих структурных состояниях, созданных путём использования специальных ТО, соответствует оптимальной величине $\tau_{cp.} \cong 850$ МПа в рамках разработанной методики (№№ 13, 14 на рис. 2 и в табл. 2). Таким образом, у оптимальных перспективных КТС для достижения величины конструкционной прочности $\tau_{cp.} \cong 850$ МПа значения базовых механических характеристик, в соответствии с принципами оптимизации механических свойств [14, 15], должны находиться в следующих интервалах: $\sigma_{0,2} = 1525-1640$ МПа, $\sigma_B = 1545-1665$ МПа, $\psi_K = (14,5-23,0)\%$.

Сравнительный анализ данных, приведённых в табл. 1 и 2, показывает, что на величину параметра $\tau_{cp.}$ основное влияние оказывают базовые механические характеристики: $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K , а также показатель деформационного упрочнения n . Значения этих характеристик формируют уровень параметра S_K [15], который, в конечном счёте, определяет величину конструкционной прочности $\tau_{cp.}$ по (1).

Понятно, что увеличение показателя $\tau_{cp.}$ требует повышения исходной прочности $\sigma_{0,2}$ сплава, однако такое повышение должно быть тесно согласованным с изменением других свойств, так как именно определённое сочетание комплекса простых базовых характеристик металла ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K) формирует величины более сложных (комплексных) параметров (n , S_K , $S_K/\sigma_{0,2}$), которые, в итоге, и контролируют уровень $\tau_{cp.}$ — в этом и состоит принцип сбалансированного формирования рационального комплекса механических свойств в системе их взаимосвязи «пластичность–прочность–деформационный резерв прочности» [3].

На рисунке 3 показано, что такой принцип не всегда соблюдался технологами на пути увеличения конструкционной прочности $\tau_{cp.}$: на кривых 1 и 2 чётко видно, что превышение уровня прочности $\sigma_{0,2}$ выше 1125 МПа не только не ведёт к увеличению $\tau_{cp.}$, но и даже грозит потерей конструкционной прочности в силу явного охрупчивания сплава (кривая 1). Кривая 3 на указанном рисунке отражает эволюцию наилучших значений конструкционной прочности $\tau_{cp.}$ крепёжных болтов, оптимизированных с точки зрения рационального сочетания характеристик прочности $\sigma_{0,2}$, пластичности ψ_K и деформационной стойкости $S_K/\sigma_{0,2}$.

Можно отметить три характерные группы сплавов, отвечающие максимальным значениям $\tau_{cp.}$ в соответствующей группе прочности

$\sigma_{0,2}$: для интервала $\sigma_{0,2} = 1000-1200$ МПа предел максимального уровня $\tau_{ср.} = 700-730$ МПа (кривая 1 на рис. 3), для интервала $\sigma_{0,2} = 1200-1400$ МПа — $\tau_{ср.} \cong 800$ МПа (кривая 2 на рис. 3), а для $\sigma_{0,2} > 1500$ МПа — $\tau_{ср.} \cong 850$ МПа (кривая 3 на рис. 3). При этом сбалансированное значение пластичности для таких сплавов составляет соответственно: $\psi_K \cong (60-70)\%$ (кривая 1 на рис. 3, табл. 1), $\psi_K \cong (20-40)\%$ (кривая 2 на рис. 3, табл. 1), $\psi_K \cong (15-25)\%$ (кривая 3 на рис. 3, табл. 2).

Примечательно, что каждому оптимальному значению пластичности ψ_K отвечает своё оптимизированное значение параметра $S_K/\sigma_{0,2}$: 1,11-1,13 (кривая 1 на рис. 3, табл. 1), 1,05-1,10 (кривая 2

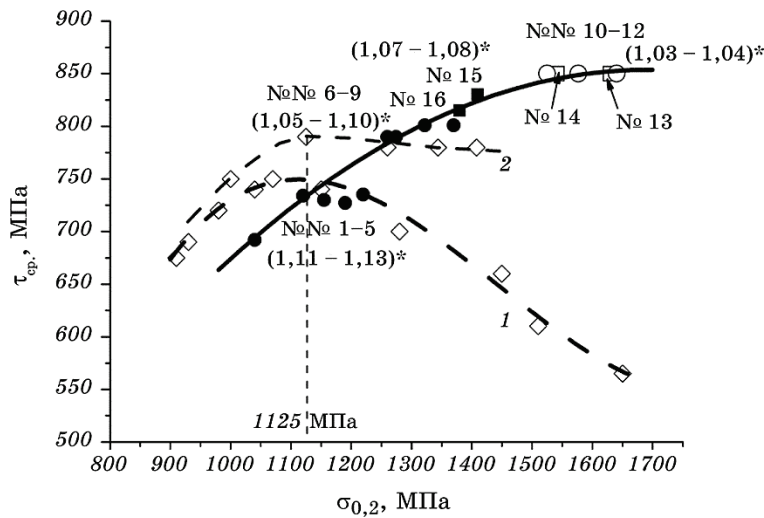


Рис. 3. Зависимости конструкционной прочности $\tau_{ср.}$ от исходной прочности $\sigma_{0,2}$ КТС: \diamond — экспериментальные данные, полученные в лабораториях ГП «Антонов» и др.; \bullet — №№ 1-9 в табл. 1; \circ — №№ 10-12 в табл. 2 — оптимизированные по (1); \square — №№ 13, 14 в табл. 2 — оптимальные из банка данных ИМФ; \blacksquare — №№ 15, 16 в табл. 2 — наивысшие показатели $\tau_{ср.}$ для сплава ВТ22, полученные в ИМФ [11] и в ГП «Антонов» [12]; 1, 2 — кривые неоптимизированного повышения $\sigma_{0,2}$; 3 — кривая оптимизированного повышения $\sigma_{0,2}$; * — интервалы изменения показателя $S_K/\sigma_{0,2}$ по данным табл. 1, 2.

Fig. 3. Dependences of the structural strength τ_{slice} on the initial strength σ_Y of STA: \diamond —experimental data obtained in the laboratories of the ‘Antonov’ Co. and others; \bullet —Nos. 1-9 in table 1; \circ —Nos. 10-12 in Table 2—optimized by (1); \square —Nos. 13, 14 in Table 2—optimal from the data bank IMP; \blacksquare —Nos. 15, 16 in Table 2—the highest values of τ_{slice} for the BT22 alloy obtained in the IMPh-NASU [11] and in the ‘Antonov’ Co. [12]; 1, 2—curves of non-optimized increase of σ_Y ; 3—curve of optimized increase of σ_Y ; *—intervals of changing of S_f/σ_Y parameter according to data in Tables 1, 2.

на рис. 3, табл. 1), 1,03–1,04 (кривая 3 на рис. 3, табл. 2), которое, как и на образцах с кольцевым надрезом, снижается с ростом $\sigma_{0,2}$ [3].

Важно отметить, что на указанных выше неоптимизированных путях технологического поиска наивысших значений $\tau_{\text{ср.}}$ не контролировался такой показатель, как уровень технологического параметра отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ [14], который варьировался в достаточно широких пределах — от 0,90 до 0,99, а этот параметр в значительной мере влияет на формирование величины показателя деформационного упрочнения n — одного из факторов формирования уровня $\tau_{\text{ср.}}$. Таким образом, неконтролируемые по принципам оптимизации комплекса механических свойств технологические пути (кривые 1 и 2 на рис. 3) можно признать неперспективными. Совсем иная ситуация наблюдается в случае соблюдения указанных принципов формирования рациональной конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}}$ (кривая 3 на рис. 3): повышение прочности $\sigma_{0,2}$ до уровней 1525–1640 МПа при условии сохранения пластичности в пределах (14,5–23,0)% приводит к достижению желаемого рационального для КТС уровня $\tau_{\text{ср.}} \cong 850$ МПа. При этом величина параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ должна сохраняться на уровне $\cong 0,98$ – $0,99$, что обеспечивает оптимальный интервал вариации показателей деформационного упрочнения $n = 0,011$ – $0,015$ для оптимальных КТС, а величина показателя резерва деформационного упрочнения $S_K/\sigma_{0,2} \rightarrow 1,03$ (табл. 2). Здесь следует заметить, что сплавы Ti–3Al–5Mo–5V–3Cr–0,5Fe (№№ 8, 9 в табл. 1) и VT22 (№№ 15, 16 в табл. 2) расположены на кривой 3 рис. 3, что свидетельствует о перспективных технологических путях их обработки, тесно связанных с соблюдением принципов оптимизации комплекса механических свойств этих сплавов при повышении прочности $\sigma_{0,2}$, а это, в результате, приводит к повышению их конструкционной прочности $\tau_{\text{ср.}}$ (ср. с №№ 6, 7 в табл. 1).

Дополнительным вспомогательным фактором для технологов на пути формирования рационального комплекса механических свойств должен стать правильный выбор вектора технологического поиска и составление эффективной технологической карты [14], что даст возможность на практике создавать сплавы с заданными ключевыми характеристиками в системе рациональной взаимосвязи свойств «прочность–пластичность» и этим обеспечить достижение желаемого конструкционного качества металла.

Таким образом, проведённые исследования показали, что при испытаниях на чистый срез контролирующим механизмом в зоне зарождения разрушения является локальный микроскол [16, 17], поэтому неуклонно должна проявиться взаимосвязь показателя $\tau_{\text{ср.}}$ и истинного напряжения разрушения при одноосном растяжении S_K (рис. 2). Тем не менее, в реальности, на величину $\tau_{\text{ср.}}$ имеет влияние не только показатель S_K , но и весь сложный комплекс базовых

механических свойств металла ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K), который не всегда можно сформулировать в виде рациональных (оптимальных, наилучших) соотношений, обуславливающих максимальную величину τ_{cp} при данном уровне S_K . Однако установленные условия формирования указанного комплекса свойств позволяют не только целенаправленно формировать наилучшие значения τ_{cp} , но и давать обоснованную прогнозную оценку уровня дальнейшего возможного повышения этого показателя.

6. ВЫВОДЫ

1. На величину конструкционной прочности τ_{cp} авиационных крепёжных болтов из высокопрочных титановых сплавов основное влияние имеют следующие механические характеристики: условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B , относительное сужение в момент разрушения образца ψ_K , а также величина показателя деформационного упрочнения n , комплекс которых определяет конечную величину прочности сплава S_K , тесно связанную с величиной τ_{cp} .

2. С целью повышения величины конструкционной прочности авиационных крепёжных болтов из титановых сплавов до оптимального уровня $\tau_{cp} \cong 850$ МПа усилия технологов должны быть направлены на увеличение уровня параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ и одновременно на снижение величины показателя деформационного упрочнения n перспективных титановых сплавов при сохранении механических свойств в системе взаимосвязи «пластичность–прочность–деформационный резерв прочности» в интервалах оптимальных значений: пластичности ψ_K от 14,5% до 23%, прочности $\sigma_{0,2}$ от 1500 до 1600 МПа и отношения $S_K/\sigma_{0,2}$ от 1,03 до 1,04. При этом величина параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ должна сохраняться на уровне $\cong 0,98-0,99$, что обеспечивает оптимальный интервал вариации показателей деформационного упрочнения $n = 0,011-0,015$ для лучших КТС.

3. Предварительная термомеханическая и последующая скоростная термическая обработка конструкционного титанового сплава ВТ22 является перспективной комплексной технологией, позволяющей соблюдать принципы оптимизации комплекса механических свойств этого сплава при повышении его прочности $\sigma_{0,2}$, что, в результате, приводит к повышению конструкционной прочности τ_{cp} .

4. Дополнительным фактором на пути формирования рационального комплекса механических свойств должен стать правильный выбор направления технологического поиска и составление эффективной технологической карты. Это даст возможность на практике создавать сплавы с заданными ключевыми характеристиками в системе взаимосвязи свойств «пластичность–прочность–деформационный резерв прочности» и этим обеспечить достижение желаемых

мого механического и конструкционного качества металла.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Металлы. Метод испытания на срез: ОСТ 1.90148–74.*
2. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, А. Г. Моляр, С. Л. Антонюк, И. М. Гавриш, *Материалы Международной конференции «Титан-2012 в СНГ» (22–25 апреля 2012, Казань)*, с. 39.
3. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Механика машин, механизмов и материалов*, № 1: 79 (2017).
4. И. А. Биргер, Г. Б. Иосилевич, *Резьбовые и фланцевые соединения* (Москва: Машиностроение: 1990).
5. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, Д. Г. Саввакин, *Механика машин, механизмов и материалов*, № 4: 70 (2015).
6. Г. Б. Иосилевич, *Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин* (Москва: Машиностроение: 1981).
7. Г. Н. Савин, В. И. Тульчий, *Справочник по концентрации напряжений* (Киев: ПО «Высшая школа»: 1976).
8. J. H. Hollomon, *Trans. AIME. Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
9. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. V. Matviychuk, S. L. Semiatin, C. H. Ward, and S. Fox, *J. Alloys Compd.*, **457**, Iss. 1–2: 296 (2008).
10. П. Е. Марковский, *Металлофиз. новейшие технол.*, **31**, № 4: 511 (2009).
11. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, А. Г. Моляр, В. О. Мушегян, О. В. Мушегян, *Материалы Международной конференции «Титан-2012 в СНГ» (22–25 апреля 2012, Казань)*, с. 102.
12. I. M. Gavrysh, *Формування високоміцних структурно-фазових станів у деталях кріплення з титанового сплаву VT22 при обробленні в нерівноважних умовах* (Дис. ... канд. техн. наук) (Київ: ДП «Антонов»: 2017).
13. О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **35**, № 1: 129 (2013).
14. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Механическая стабильность металлов и сплавов* (Киев: Наукова думка: 2014).
15. А. В. Шиян, *Наукові основи формування раціонального комплексу механічних властивостей конструкційних сталей і титанових сплавів* (Дис. ... д-ра техн. наук) (Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська Державна академія будівництва та архітектури»: 2016).
16. Б. А. Колачев, А. В. Мальков, *Физические основы разрушения титана* (Москва: Металлургия: 1983).
17. В. Т. Троценко, В. В. Покровский, В. Л. Ярусевич, *Проблемы прочности*, № 8: 30 (1991).

REFERENCES

1. *Metally. Metod Ispytaniya na Srez: OST 1.90148–74* [Metals Shear Test Method: OST 1.90148–74] (in Russian).
2. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, A. G. Molyar, S. L. Antonyk, and I. M. Gavrysh, *Proc. International Conference ‘Titan-2012 in CIS» (April 22–*

- 25, 2012, Kazan), p. 39 (in Russian).
3. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov*, No. 1: 79 (2017) (in Russian).
 4. I. A. Birger and G. B. Iosilevich, *Rez'bovye i Flantsevye Soedineniya* [Threaded and Flanged Connections] (Moscow: Mashinostroenie: 1990) (in Russian).
 5. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and D. G. Savvakina, *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov*, No. 4: 70 (2015) (in Russian).
 6. G. B. Iosilevich, *Kontsentratsiya Napryazheniy i Deformatsiy v Detalyakh Mashin* [Concentration of Stresses and Strains in Machine Parts] (Moscow: Mashinostroenie: 1981) (in Russian).
 7. G. N. Savin and V. I. Tul'chiiy, *Spravochnik po Kontsentratsii Napryazheniy* [Handbook of Stress Concentration] (Kiev: PO 'Vysshaya Shkola': 1976) (in Russian).
 8. J. H. Hollomon, *Trans. AIME. Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
 9. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, Yu. V. Matviychuk, S. L. Semiatin, C. H. Ward, and S. Fox, *J. Alloys Compd.*, **457**, Iss. 1–2: 296 (2008).
 10. P. E. Markovsky, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **31**, No. 4: 511 (2009) (in Russian).
 11. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, A. G. Molyar, V. O. Mushegyan, and O. V. Mushegyan, *Proc. International Conference 'Titan-2012 in CIS' (April 22–25, 2012, Kazan)*, p. 102 (in Russian).
 12. I. M. Havrysh, *Formuvannya Vysokomitsnykh Strukturno-Fazovykh Staniv u Detalyakh Kriplennya z Tytanovogo Splavu VT22 pry Obroblenni v Nerivnovazhnykh Umovakh* [Formation of High-Strength Structural-Phase States in the Fastening Parts from Titanium Alloy VT22 under Non-Equilibrium Treatment] (Dissert. ... for Cand. Techn. Sci.) (Kyiv: 'Antonov' Company: 2017) (in Ukrainian).
 13. O. M. Ivasishin, P. E. Markovsky, S. A. Kotrechko, Yu. Ya. Meshkov, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **35**, No. 1: 129 (2013) (in Russian).
 14. Yu. Ya. Meshkov, S. A. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Mekhanicheskaya Stabil'nost' Metallov i Splavov* [Mechanical Stability of Metals and Alloys] (Kyiv: Naukova Dumka: 2014) (in Russian).
 15. A. V. Shiyan, *Naukovi Osnovy Formuvannya Ratsional'nogo Kompleksu Mekhanichnykh Vlastyvostey Konstruktsiynykh Staley i Tytanovykh Splaviv* [Scientific Basis for the Formation of a Rational Complex of Mechanical Properties of Structural Steels and Titanium Alloys] (Dissert. ... for Dr. Techn. Sci.) (Dnipropetrovsk: Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture: 2016) (in Ukrainian).
 16. B. A. Kolachev and A. V. Mal'kov, *Fizicheskie Osnovy Razrusheniya Titana* [Physical Basis of Titanium Destruction] (Moscow: Metallurgiya: 1983) (in Russian).
 17. V. T. Troshchenko, V. V. Pokrovskiy, and V. L. Yarusevich, *Problemy Prochnosti*, No. 8: 30 (1991) (in Russian).