

# ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Н.А. Ночовная

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Широкое применение титановых сплавов в конструкциях авиа- и ракетостроения началось в середине 60-х гг. прошлого столетия. Это было вызвано, как неоднократно указывалось, их высокой удельной прочностью в достаточно широком диапазоне температур (детали из титановых сплавов применяются в температурном диапазоне от  $-253$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ ) и уникальной коррозионной стойкостью в самых различных средах. Первые промышленные конструкционные титановые сплавы (BT5, BT5-1, OT4, BT6) имели уровень прочности  $700\text{--}950$  МПа. В современном авиастроении применяются сплавы, уровень прочности которых может достигать  $1300$  МПа (рис. 1). Это сплавы нового поколения BT23M, BT32, BT43, BT22M, BT22И. Такой уровень прочности достигается не только путем создания новых композиций, но и разработкой новых технологических процессов деформации и термообработки. При этом все разнообразие условий применения обеспечивается широким ассортиментом сплавов, имеющих соответствующий комплекс свойств.

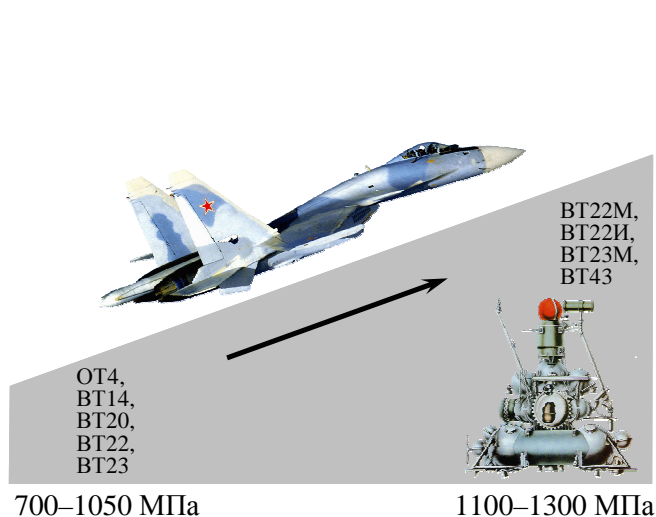


Рис. 1. Динамика роста прочности конструкционных титановых сплавов для авиации и космоса

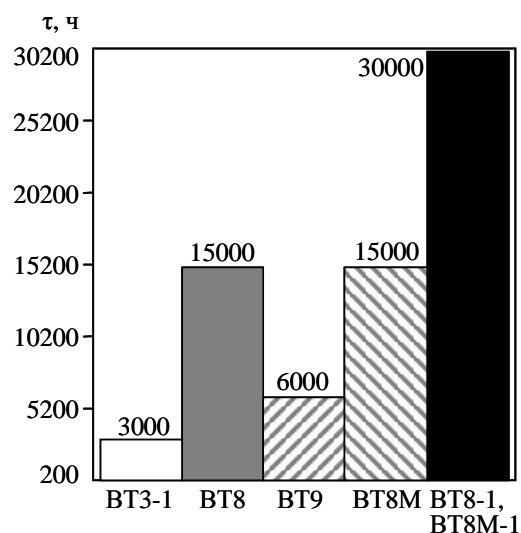
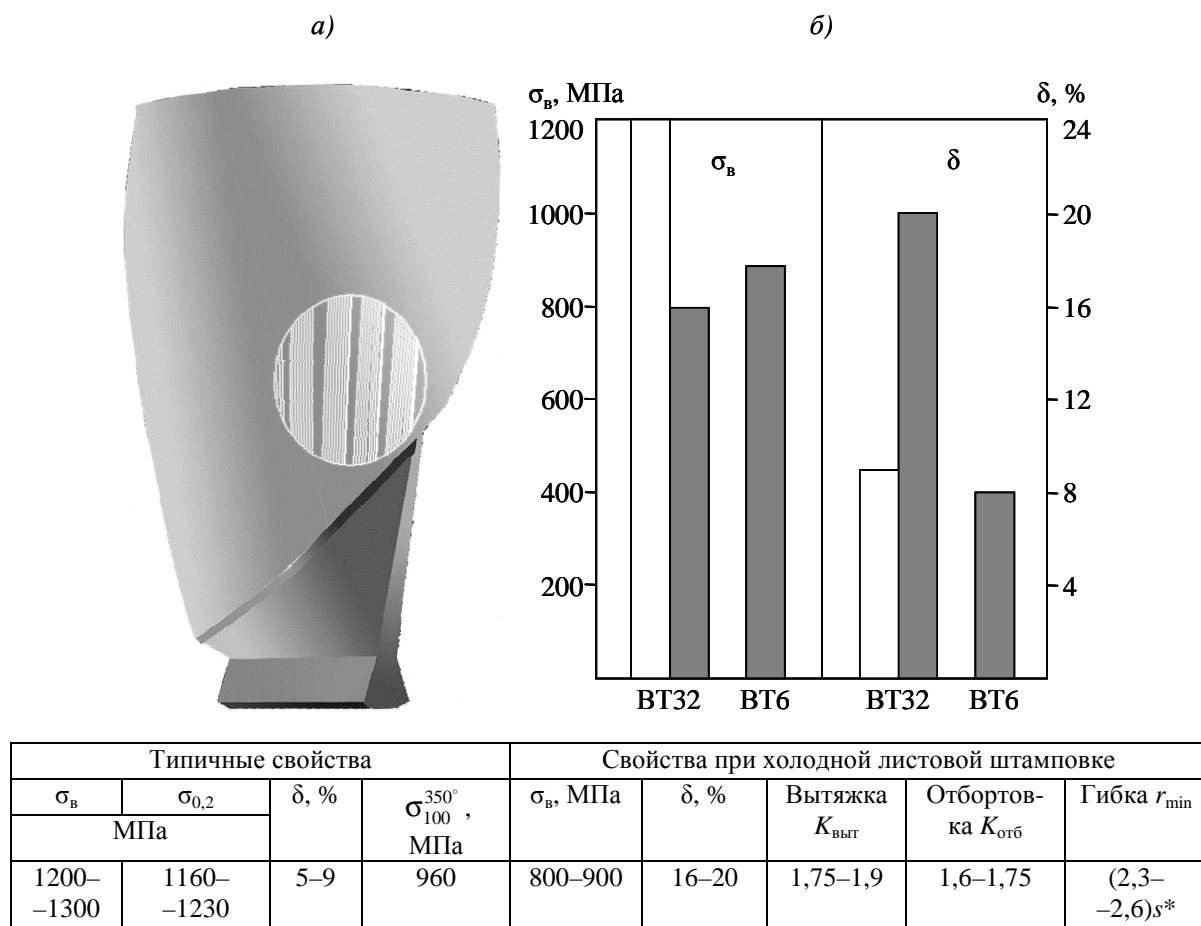


Рис. 2. Ресурс работы жаропрочных титановых сплавов при  $450^{\circ}\text{C}$

Наряду с конструкционными сплавами на основе титана большие прогрессивные изменения претерпели и жаропрочные титановые сплавы. Ресурс их работы в современном двигателе достигает  $30000$  ч при температуре эксплуатации  $450^{\circ}\text{C}$  (рис. 2).

Уровень эксплуатационных свойств как конструкционных, так и жаропрочных титановых сплавов, применение которых планируется в самолетах и двигателях нового поколения, не ограничивается только повышением предела прочности. Прежде всего, должен быть обеспечен уровень характеристик, повышающих как ресурс, так и безопасность полета, – вязкость разрушения, предел выносливости и т. д. Так, скорость роста усталостной трещины для деталей из высокопрочных конструкционных титановых сплавов должна составлять не менее  $1$  мм/цикл, а вязкость разрушения  $K_{Ic} \geq 70$  МПа·м<sup>1/2</sup>. Сплавы, применяемые в двигателях (компрессор низкого и высокого давления), должны иметь уровень малоциклового усталости ( $\sigma_{\max}$ ) до  $950$  МПа (при  $N=5 \cdot 10^4$  цикл,  $R=0,1$ ) при кратковременной прочности более  $1050$  МПа. Значительные изменения в сфере требований к конструкционным материалам на базе титана обусловлены следующими современными тенденциями.

– В связи со значительным увеличением доли титановых сплавов в планере создаваемых современных самолетов возникает потребность в разработке сплавов, отличающихся высоким уровнем прочности и жесткости в сочетании с высокой пластичностью на стадии изготовления тонколистовых заготовок. Эти требования могут быть обеспечены сплавами на основе  $\beta$ -фазы ( $\beta$ - или псевдо- $\beta$ -сплавы.). В закаленном состоянии эти сплавы чрезвычайно пластичны и легко поддаются значительной деформации. В то же время последующее низкотемпературное старение ( $450\text{--}550^\circ\text{C}$ ) приводит к повышению уровня их прочностных свойств до  $\sigma_B=1400\text{--}1500$  МПа. Примером таких сплавов может служить зарубежный сплав SP700 и сплав BT32, созданный в ВИАМ и прошедший стадию промышленного освоения, применение которого планируется для широкохордной лопатки вентилятора (рис. 3).



\*  $s$  – толщина листа.

Рис. 3. Модельная полая широкохордная лопатка вентилятора из сплава BT32 с несущими стержнями из МКМ (а) и уровень свойств (б) высокопрочного и высокотехнологичного сплава BT32 (в сравнении со свойствами сплава BT6) в упрочненном (□) и отожженном состоянии (■)

Сплав обладает высокой пластичностью в отожженном состоянии, что позволяет изготавливать тонкие оболочки широкохордных лопаток методом листовой штамповки. Последующий процесс высокотемпературной пайки оболочек из этого сплава, осуществляемый в аргоно-вакуумных печах, может быть совмещен с процессом термического упрочнения.

Применение сплава для изготовления тонкой оболочки широкохордной лопатки вентилятора, длительно работающей при температурах до  $350\text{--}400^\circ\text{C}$ , обеспечивает увеличение прочности на 20–25% ( $\sigma_B^{20^\circ} \geq 1200$  МПа,  $\sigma_B^{400^\circ} \geq 950$  МПа) и трещиностойкости на 20% ( $K_c^y \geq 110$  ГПа) по сравнению с использованием сплавов BT20, BT6 и BT23,

а также снижение массы на 15% и трудоемкости на 25%. Сплав ВТ32 опробован в условиях ВСМПО при изготовлении листовых полуфабрикатов.

– Появление двигателей V и VI поколений, у которых температурно-силовые параметры существенно превосходят существующие ныне, обуславливает создание новых жаропрочных материалов на основе титана с более широким температурным интервалом применения и повышенными ресурсными характеристиками. Известно, что созданные на сегодняшний день жаропрочные титановые сплавы могут успешно работать лишь до температур 550–600°C. Ограничение в рабочих температурах вызвано тем, что при температурах 600–630°C меняется механизм окисления титана. В компрессорах современных авиадвигателей зарубежных фирм для работы в горячей части применяются титановые сплавы Ti6242S, IMI829, IMI834, планируется применение сплава Ti1100. Ресурс работы этих сплавов при названных температурах достигает 500 ч. Вместе с тем его увеличение лимитируется также проблемами термической стабильности. В ВИАМ создан жаропрочный титановый сплав ВТ41, термическая стабильность которого позволяет ему длительно работать при температуре 600°C (рис. 4).

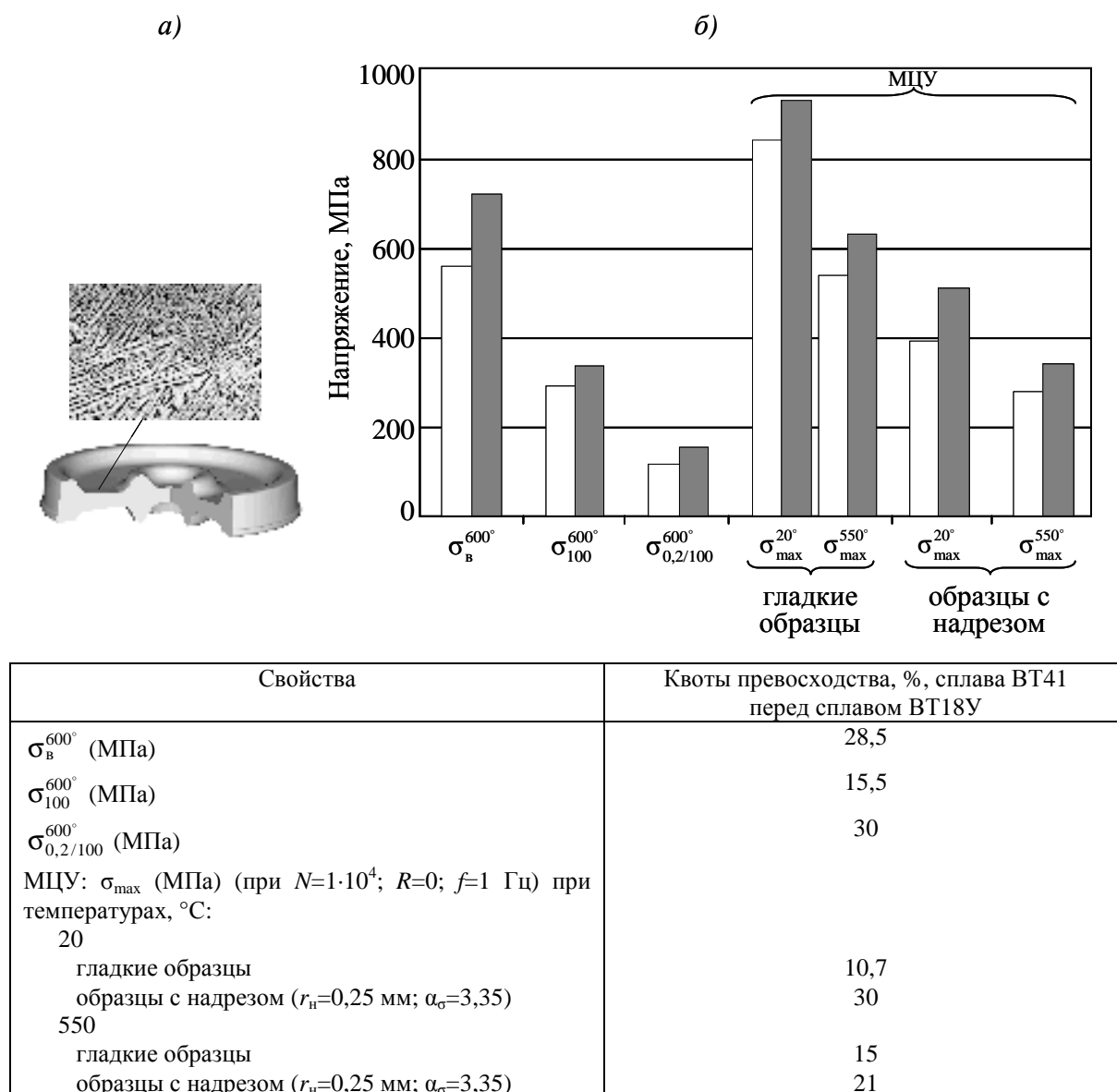
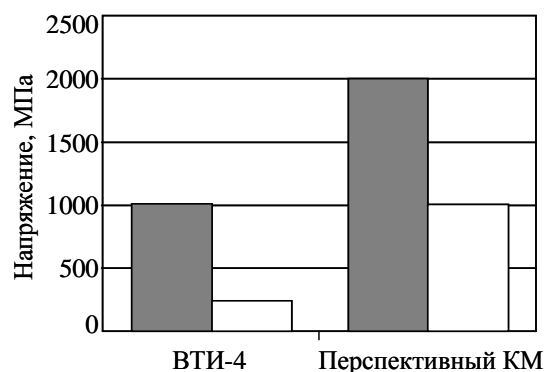


Рис. 4. Сплав ВТ41:

а – штамповка диска КВД из сплава ВТ41 и структура ( $\times 1000$ ) полотна; б – уровень свойств сплавов ВТ41 (■) и ВТ18У (□)

Проблему дальнейшего расширения температурного интервала применения титановых сплавов можно решить лишь с помощью создания технологичных сплавов на базе алюминидов титана и технологий их обработки (рис. 5).

Рис. 5. Механические свойства ( $\blacksquare$  –  $\sigma_{\text{в}}^{20^\circ}$ ;  $\square$  –  $\sigma_{100}^{650^\circ}$ ) сплава ВТИ-4 ( $d=5100 \text{ кг/м}^3$ ) и перспективного КМ на его основе ( $d \approx 4300 \text{ кг/м}^3$ )



– Еще одним важным аспектом в развитии титанового металловедения является создание композиционных материалов на основе титана. В последние несколько лет роль композиционных материалов в конструкции летательных аппаратов резко возросла, так как именно они могут резко повысить весовую отдачу планера. Такие материалы обладают низкой плотностью, высокими жесткостью и удельной прочностью. Они могут применяться в качестве шумопоглощающих панелей, так как повышают акустическую выносливость более чем в 3 раза по сравнению с металлическими материалами, а также в качестве силовых элементов планера вследствие повышенной вибропрочности, виброжесткости и высокой трещиностойкости (СРТУ:  $d2l/dN$  при  $\Delta K=28,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  составляет 0,05–0,1 мм/цикл).

Все вышеперечисленные требования могут быть обеспечены не столько созданием новых химических композиций сплавов, сколько разработкой новых технологических процессов, таких как экструзия, изотермическая штамповка, фасонное литье и т. д. Так, применение изотермической штамповки при производстве крупногабаритных штамповок позволяет повысить коэффициент использования металла при формообразовании на 20–30% и получить точную заготовку с однородной микроструктурой по всему объему заготовки. Использование фасонного литья снижает себестоимость производства деталей в  $\sim 2$ – $2,5$  раза.

Следует заметить, что само по себе производство титановой губки и полуфабрикатов из титановых сплавов является признаком высокой технологии. Только четыре страны в мире производили подобную продукцию. К ним относятся: США, Англия, Япония и Россия. Сейчас в данном направлении интенсивно прогрессирует Китай. Однако, помимо проблем, связанных с созданием нового поколения титановых сплавов, материалов на их основе и разработкой прогрессивных технологических процессов производства деталей и полуфабрикатов, существуют и проблемы, обусловленные меняющейся политической и экономической ситуацией. В первую очередь это резкое снижение потребления титановых сплавов отечественными производителями: в 1990 г. потребление титана в СССР составляло более 110 тыс. тонн, а в 2006 г. 4,5 тыс. тонн (данные «ВСМПО-АВИСМА»). Второй большой проблемой является резкий скачок цен на титановую губку и, следовательно, на титановые полуфабрикаты и изделия. Монопольное положение корпорации «ВСМПО-АВИСМА» делает рост цен на губку и титановую продукцию в целом практически неконтролируемым. Так, только за период январь – ноябрь 2006 г. цена на губку выросла более чем в 2 раза. И, наконец, основной проблемой является отсутствие в России собственной сырьевой базы для производства титановой губки. Все сырье для производства титановой губки ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» закупает на Украине.

В силу сказанного становится очевидным, что в ближайшем будущем Россия может остаться без сырья для производства титана, что резко отрицательно скажется на

качестве и конкурентоспособности авиакосмической продукции и, в конечном счете, на оборонном потенциале страны.

Основу минерально-сырьевой базы титана РФ составляют 20 месторождений (из них 11 коренных и 9 россыпных), сравнительно равномерно размещенных по территории страны. Уникальным по своему происхождению, запасам и содержанию диоксида титана в рудах, а также по наличию в нем нефти является Ярегское месторождение лейкоксеновых нефтеносных песчаников, расположенное в Республике Коми. К ильменитоносным россыпям относятся Тулунское (Иркутская обл.) и Николаевское (Кемеровская обл.) месторождения, россыпи комплексного состава представлены Центральным (Тамбовская обл.), Лукояновским (Нижегородская обл.), Тарским (Омская обл.), Туганским и Георгиевским (Томская обл.) месторождениями. Проведенный анализ современного состояния минерально-сырьевой базы титана позволяет отнести к активным лишь 31,2% запасов, из которых 29,2% – запасы собственно титановых месторождений и 2% – запасы месторождений, из руд которых титан извлекается попутно. Выделяемые в качестве активных и перспективно оцененных запасы позволяют нашей стране решить вопрос обеспечения внутренних потребностей и возможности выхода ее на сформировавшийся международный рынок титанового сырья.

Решение вышеуказанных проблем, в частности снижения цен на титановую продукцию, по мнению специалистов, может быть осуществлено путем проведения ряда мероприятий, таких как:

- организация альтернативного производства титановых полуфабрикатов на базе Ступинской титановой компании (СТК), Ступинского металлургического комбината (СМК), Всероссийского института легких сплавов (ВИЛС), ОАО МЗ «Электросталь» и др.;
- поставка титановых полуфабрикатов оборонным заводам страны по внутренним ценам;
- создание новых прогрессивных технологических процессов, радикально снижающих энергетические затраты и повышающих коэффициент использования металла, – таких как экструзия, изотермическая деформация, энергосберегающие процессы термической обработки, фасонное литье.

*А.Н. Петухов\**

## **АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ДЕТАЛЕЙ ИЗ НИХ**

Внедрение новых конструктивных решений, перспективных материалов и технологических процессов требует глубоких всесторонних исследований напряженно-деформированного состояния (НДС), механических свойств материалов и прочности натуральных деталей в условиях, приближенных к эксплуатационным по воздействию статических, циклических и вибрационных нагрузок и эксплуатационных температур.

Конструктивные особенности деталей ГТД (лопатки, диски, валы и др.), эксплуатационные условия, формирующие их НДС, и несущая способность тесно связаны с технологией изготовления и оказывают решающее влияние на сопротивление МЦУ и МнЦУ.

В ЦИАМ выполнен ряд комплексных прочностных исследований на МЦУ, МнЦУ с целью выявления роли технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов.

---

\* ФГУП «ЦИАМ им. Баранова».