



Высокопрочные титановые сплавы в самолетостроении

В.Н. Моисеев

Ноябрь 2001

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Технология
легких сплавов», № 4, 2002 г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Высокопрочные титановые сплавы в самолетостроении

В.Н. Моисеев

Всероссийский институт авиационных материалов

Использование высокопрочных титановых сплавов с $\sigma_{\text{в}} \geq 1000$ МПа в отечественном пассажирском и транспортном самолетостроении началось с середины шестидесятых годов.

Впервые в 1964–1965 гг. для самолета Ил-62 было изготовлено и использовано стояночное шасси из сплава ВТ14 в отожженном ($\sigma_{\text{в}} > 950$ МПа) и термически упрочненном ($\sigma_{\text{в}} \geq 1100$ МПа) состояниях.

В последующих самолетах КБ Ильюшина Ил-76, Ил-86, Ил-96 и др. изготавливали конструкции шасси, в том числе и сварные, из титанового сплава ВТ22 с $\sigma_{\text{в}} \geq 1100$ –1250 МПа.

Высокопрочный титановый сплав ВТ22 использовали также для изготовления деталей и конструкций механизации крыла, пилонов, компенсационных пружин, торсионов и др.

Применение высокопрочных титановых сплавов в КБ Ильюшина позволило, по мнению Генерального конструктора, получить экономию веса деталей и конструкций примерно на 20% по сравнению с аналогичными конструкциями из высокопрочных сталей.

Несколько позже в КБ Антонова для аналогичных целей был широко использован высокопрочный титановый сплав ВТ22 в изделиях Ан-124, Ан-225 и др. Весовая эффективность от применения титанового сплава вместо стали, по мнению Генерального конструктора О.К. Антонова, составила 10–15% на различных конструкциях.

В КБ Яковлева в пассажирском самолете Як-42 из высокопрочного титанового сплава ВТ22 наряду с лонжеронами и шпангоутами использовались подшассийные панели и другие многочисленные детали из высокопрочных титановых сплавов. Средняя экономия веса от использования титана составляла 15–20%.

Особенно эффективно применение титановых высокопрочных сплавов в морском авиастроении. Здесь наряду с весовой отдачей конструкций большую роль играет коррозионная стойкость используемых металлических материалов. Выигрыш в весе может достигать на отдельных деталях и конструкциях 25–30% по сравнению со стальными. Так, в самолете Бе-200 КБ Бериева широко использован для силовых конструкций титановый сплав ВТ22 с $\sigma_{в} \geq 1100\text{--}1250$ МПа и ужесточенными требованиями по легированию и примесям, позволяющий получать наилучшую весовую отдачу и коррозионную стойкость в морской среде.

Следует особо отметить большую эффективность использования высокопрочных титановых сплавов в качестве болтов, винтов и других деталей крепежа.

В качестве сплава для нормализованных деталей крепежа разработан титановый сплав марки ВТ16, который используется в «деформационно-упрочненном» состоянии с $\sigma_{в} = 1050\text{--}1115$ МПа. Особенностью сплава ВТ16 является то, что из отожженного прутка, имеющего предел прочности около 850 МПа, в холодном состоянии, без промежуточных отжигов, высаживается головка болта, редуцируется стержень и хвостовик, а также накатывается резьба. Благодаря холодному деформированию готовый болт приобретает гарантированный предел прочности ≥ 1050 МПа и $\tau_{ср} \geq 650$ МПа. В этом состоянии детали ставятся на изделие. Такая технология производства деталей в 2–3 раза дешевле, чем традиционная технология горячей высадки головки болтов.

Эта технология впервые была использована при производстве сверхзвукового пассажирского самолета Ту-144 и освоена в крупносерийном производстве на АО «Нормаль» в г. Нижний Новгород. В настоящее время все высокопрочные нормализованные детали крепления для авиационной промышленности изготавливают централизованно из сплава ВТ16 с $\sigma_{в} \geq 1050$ МПа. Многолетний опыт эксплуатации (около тридцати лет) показал высокие ресурс и надежность таких деталей.

Весьма актуальной задачей повышения весовой отдачи титановых сплавов в самолетостроении является дальнейшее увеличение их прочностных характеристик. Вообще, повышение характеристик прочности металлических материалов является одной из основных задач авиационного материаловедения. В этом отношении титановые сплавы являются весьма перспективным материалом, пригодным для длительной работы при достаточно высоких температурах – 550–600°С.

Многолетние фундаментальные исследования и опыт эксплуатации различных типов титановых сплавов в авиакосмических конструкциях показали, что наиболее перспективными (как конструкционный материал) являются титановые сплавы, представляющие α - и β -твердые растворы. Сплавы с $(\alpha+\beta)$ -структурой обеспечивают наилучшее соотношение характеристик прочности, пластичности, трещиностойкости и других показателей, обеспечивающих высокую весовую отдачу, ресурс и надежность изделия.

Повышение характеристик прочности твердорастворных сплавов достигается путем упрочнения легированием α - и β -твердых растворов, а также дисперсионным упрочнением смеси α - и β -фаз в процессе упрочняющей термической обработки – закалки и старения (рис. 1).

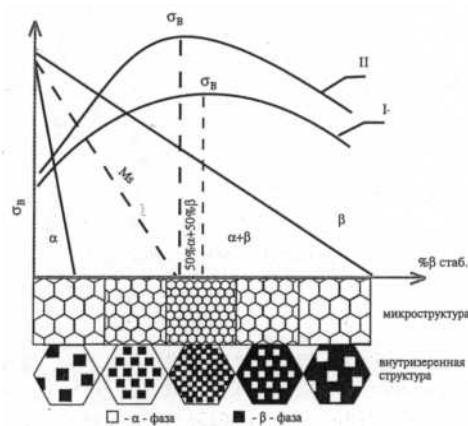


Рисунок 1. Схематическая связь между содержанием β -стабилизирующих элементов, термической обработкой и структурой твердорастворных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов

Максимум по прочности у отожженных сплавов приходится на состав, содержащий примерно равное количество α - и β -фаз, что обусловлено максимальной гетерогенизацией микро- и макроструктуры.

У сплавов в закаленном и состаренном состоянии максимум по прочности наблюдается у сплавов, по составу близких к критическому, когда образуется максимальный объем дисперсных составляющих, упрочняющих сплав. Поскольку упрочнение сплава складывается в основном из названных выше механизмов, то можно считать, что наиболее упрочняемыми сплавами являются $(\alpha+\beta)$ -титановые сплавы с коэффициентом стабилизации β -фазы (K_β) в пределах от 0,8 до 1,4 [1–3]. Сюда относятся также сплавы ВТ16 ($K_\beta=0,8$), ВТ23 ($K_\beta=0,8$), ВТ22 ($K_\beta=1,05$), ВТ35 ($K_\beta=1,45$) и некоторые другие.

Проиллюстрируем (рис. 2) возможности получения высокой прочности на титановом сплаве переходного типа ВТ22 (пруток $\varnothing 20$ мм).

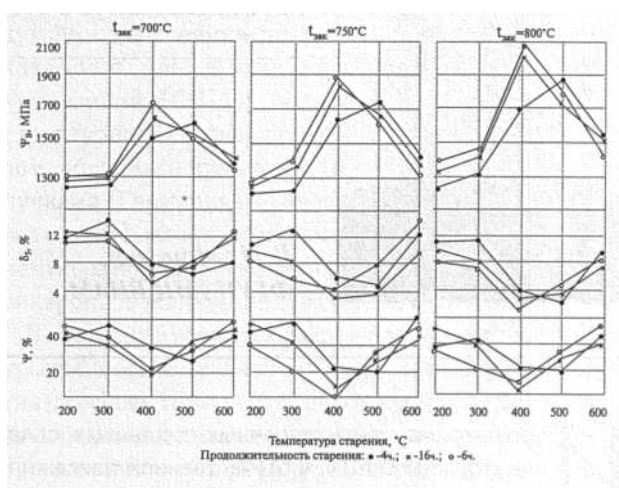


Рисунок 2. Механические свойства сплава ВТ22 (пруток $\varnothing 20$ мм) после различных режимов упрочняющей термической обработки

Как следует из представленных данных, сплав такого типа может достичь высокой прочности (до 2000 МПа), однако с повышением прочности существенно снижаются характеристики пластичности.

Тенденция к снижению характеристик пластичности и трещиностойкости, повышению чувствительности к концентрации напряжений с увеличением прочности наблюдается у всех титановых

сплавов и является основной проблемой при освоении высокопрочных титановых сплавов.

Связь между величиной прочности и характеристиками пластичности, трещиностойкости и чувствительности к концентраторам напряжений иллюстрируется данными, приведенными на рис. 3 и 4.

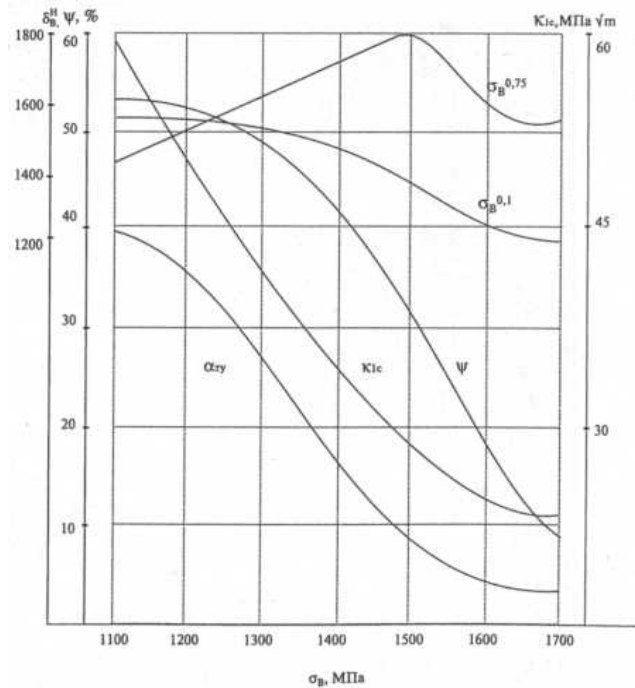


Рисунок 3. Связь предела прочности, полученной термической обработкой, с другими механическими свойствами титанового сплава VT22

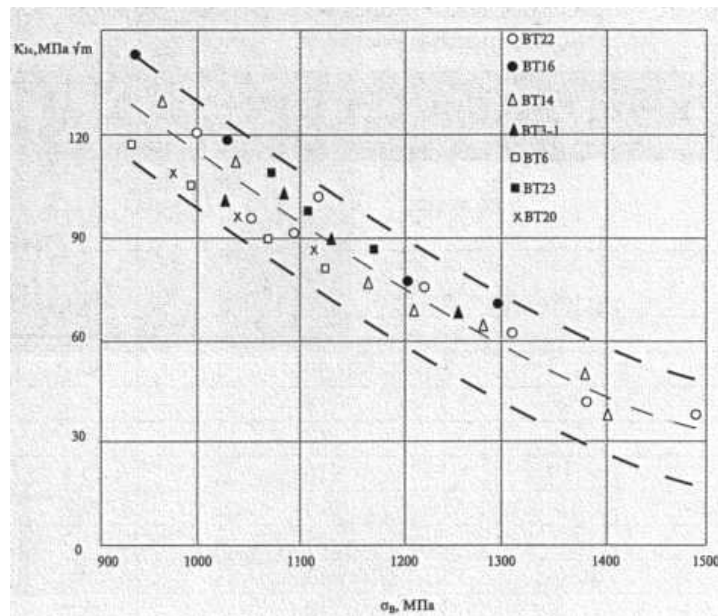


Рисунок 4. Зависимость вязкости разрушения различных титановых сплавов от уровня прочности

Здесь возникает сложный и многоплановый вопрос критериев, определяющих возможность использования сплавов с большим или меньшим уровнем прочности в тех или иных деталях и конструкциях авиакосмической техники, а также допустимых норм по пластичности, трещиностойкости, чувствительности к концентраторам и другим служебным характеристикам, определяющим ресурс и надежность.

Чаще всего этот вопрос решается путем анализа условий работы изделия, имеющегося опыта эксплуатации аналогичных изделий и некоторыми другими факторами. С другой стороны, проводится оценка различных характеристик предлагаемого к использованию титанового сплава, включающая прочностные характеристики, пластичность, трещиностойкость и другие служебные характеристики.

В некоторых областях применения высокопрочных титановых сплавов сложилось достаточно устойчивое представление о надежном использовании сплавов с тем или иным уровнем прочности и значениями служебных характеристик:

– в силовых конструкциях (шасси, механизмах крыла, пилонах и др.) пассажирских и транспортных самолетов используются титановые сплавы со свойствами – $\sigma_B=1100-1250$ МПа; $K_{Ic}=62$ МПа·м^{1/2}; МЦУ при $K_t=2,6$ и $N=10^5$ циклов $\sigma_{max} \geq 500$ МПа;

– в маневренных самолетах практически все силовые конструкции можно изготавливать из высокопрочных титановых сплавов со свойствами – $\sigma_B=1150-1300$ МПа; $K_{Ic}=53,8$ МПа·м^{1/2}; МЦУ при $K_t=2,6$ и $N=10^4$ циклов $\sigma_{max} > 550$ МПа;

– в дисках и лопатках вентилятора и компрессора низкого давления авиационного двигателя, работающих при температурах до 300–350°C, используют титановые сплавы с $\sigma_B=1150-1250$ МПа; $K_{Ic}=57,2$ МПа·м^{1/2}; МЦУ при $K_t=3,0$ и $N=10^5$ циклов $\sigma_{max} \geq 550$ МПа и $\sigma_B^H/\sigma_B = 1,4$;

– отдельные детали и конструкции авиакосмической техники можно изготавливать из титановых сплавов с более высокой прочностью, чем

указывалось выше. Так, например, упругие элементы (торсионы, компенсационные пружины и др.) изготавливают с гарантированным пределом прочности от 1200 до 1300 МПа, емкости высокого давления, корпуса твердотопливных двигателей, центрифуги можно изготавливать из титановых сплавов с $\sigma_B=1300-1350$ МПа.

Современная номенклатура высокопрочных титановых сплавов представлена в таблице.

Высокопрочные промышленные титановые сплавы

Марка сплава	$K_{\beta\text{стаб}}$	Механические свойства (термоупрочненное состояние)			
		σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
		не менее			
BT6	0,3	1050	6	20	30
BT14	0,6	1100	6	35	30
BT16	0,8	1050	12	40	30
BT23	0,9	1100	8	18	35
BT22	1,2	1150	8	18	35
BT22И	1,2	1100	10	16	35
BT37	1,2	1200	6	14	30
BT35	1,5	1150	7	15	35
BT32	1,8	1200	6	14	30
BT15	2,4	1200	5	12	25

Важной характеристикой высокопрочных титановых сплавов является их прокаливаемость, т. е. способность упрочняться до заданного уровня прочности путем закалки и старения.

Прокаливаемость твёрдорастворных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов зависит от ряда факторов: легирования сплава β -стабилизирующими элементами, температуры закалки, температуры и продолжительности старения.

На рис. 5 представлена зависимость между прокаливаемым сечением (в мм) и содержанием β -стабилизирующих элементов, выраженных через K_{β} , при упрочнении сплавов на уровень, предусмотренный действующей технической документацией и представленный в таблице.

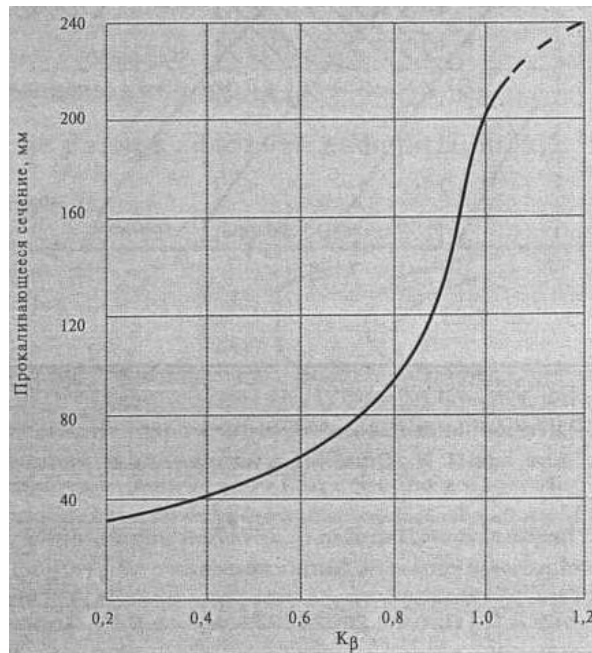


Рисунок 5. Зависимость прокаливаемости от коэффициента стабилизации β-фазы (K_{β}).

У титановых сплавов с $K_{\beta} \geq 1,0$, по мере увеличения содержания β-стабилизирующих элементов, β-фаза сохраняется при все меньших скоростях охлаждения. Основываясь на этом обстоятельстве, разработали технологический процесс упрочняющей термической обработки деталей и конструкций без переноса в закалочную среду, когда метастабильная β-фаза сохраняется при скоростях охлаждения 5–10°C/мин, т. е. при скоростях, соизмеримых со скоростью охлаждения садки вместе с печью. Последующее старение повышает прочность металла, например, сплава ВТ22 до 1150–1250 МПа. Такая технология позволяет изготавливать крупногабаритные нежесткие самолетные конструкции, в том числе и сварные, путем упрочняющей термической обработки в печах с защитной атмосферой неокисленными и без поводок. Как показала практика, конструкции, изготовленные по такой технологии, обладают повышенным ресурсом и надежностью благодаря устранению остаточных напряжений.

Некоторым ресурсом повышения весовой отдачи изделий из титановых сплавов может явиться совершенствование качества металлургического производства (плавка слитков, технология производства полуфабрикатов и др.) (рис. 6).

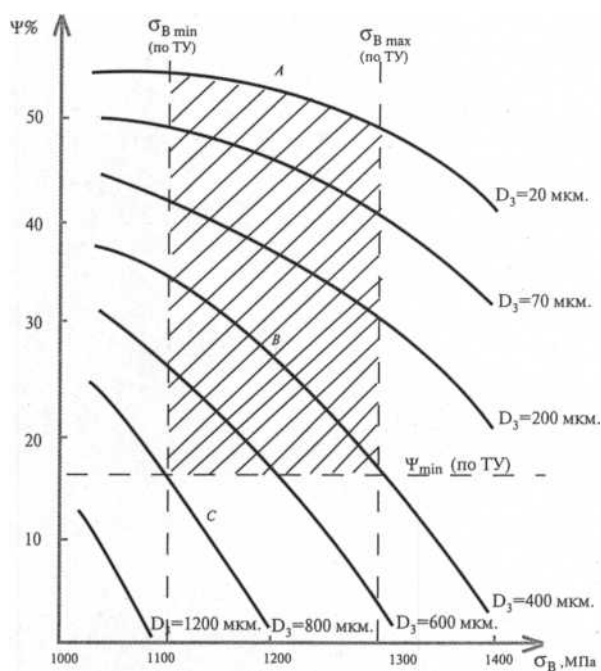


Рисунок 6. Связь между величиной микрзерна, пределом прочности и относительным сужением у титанового сплава переходного класса VT22

Такие же потенциальные возможности имеются и в процессе изготовления деталей и конструкций в машиностроительном производстве (качество поверхности, контроль внутренних напряжений, использование различных методов облагораживания поверхности) и др.

Еще большие возможности повышения весовой отдачи имеются в процессе проектирования высоконагруженных конструкций и, в первую очередь, исключения высоких концентраций напряжений, использования поверхностного упрочнения и других многочисленных приемов, применяемых в современном машиностроении.

Важным направлением повышения характеристик прочности сплавов в авиакосмическом машиностроении является разработка новых высокопрочных титановых сплавов с более гетерогенизированной структурой, чем двухфазные ($\alpha+\beta$)-сплавы. Это сплавы с интерметаллидным типом упрочнения, а также титановые сплавы с метастабильными структурными составляющими. Имеются и некоторые другие направления дальнейшего развития высокопрочных титановых сплавов, которыми интенсивно занимается ВИАМ.

Список литературы:

1. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1980, с. 269–357.
2. Моисеев В.Н. Основные направления развития титановых сплавов для современного машиностроения // МиТОМ, 1997, №7, с. 30–34.
3. Моисеев В.Н. Высокопрочные титановые сплавы для крупногабаритных деталей авиационного двигателя // МиТОМ, 2000, №2, с.34–36.
4. Машиностроение: Энциклопедия. – М., 2001, т. 1–2 / Титан. С. 272–347.
5. Пат. №2044094 / Хорев А.И., Моисеев В.Н.; Пат. №2089641 / Хорев А.И., Моисеев В.Н.; Пат. №1695696 / Хорев А.И.; Пат. №2082802 / Моисеев В.Н., Хорев А.И. А.с. 1600386 / Тетюхин В.В., Хорев А.И., Моисеев В.Н.