

Применение титановых сплавов для шатунов высокофорсированных авиационных дизелей

77-30569/229603

09, сентябрь 2011

Калинин А. О., Краснокутский А. Н.

УДК 621.436

МГТУ им. Н.Э. Баумана

alex.motors@mail.ru

krasnokutsky07@mail.ru

1. Предпосылки к применению титановых сплавов в авиационных поршневых двигателях

В авиационной отрасли задача по снижению удельной массы энергетических установок стоит более остро, чем для наземного транспорта. Связано это с летно-техническими характеристиками воздушных судов, на которые в большой степени влияют такие параметры, как максимальный взлетный вес и развесовка. Развесовка является особо важным параметром в легкой авиации, в частности для одномоторных воздушных судов. Снижение массы силовой установки может позволить достичь заданных при проектировании летно-технических характеристик воздушного судна при его минимальном взлетном весе. В современной гражданской авиации важное значение имеют увеличение ресурса летательных аппаратов, минимизация размеров агрегатов, а также экономичность, технологичность и весовая эффективность, которая во многом определяется характеристиками удельной прочности и [6]. По этим и другим параметрам в коммерческом самолетостроении возрастает потребность в титане и его сплавах (рис. 1).

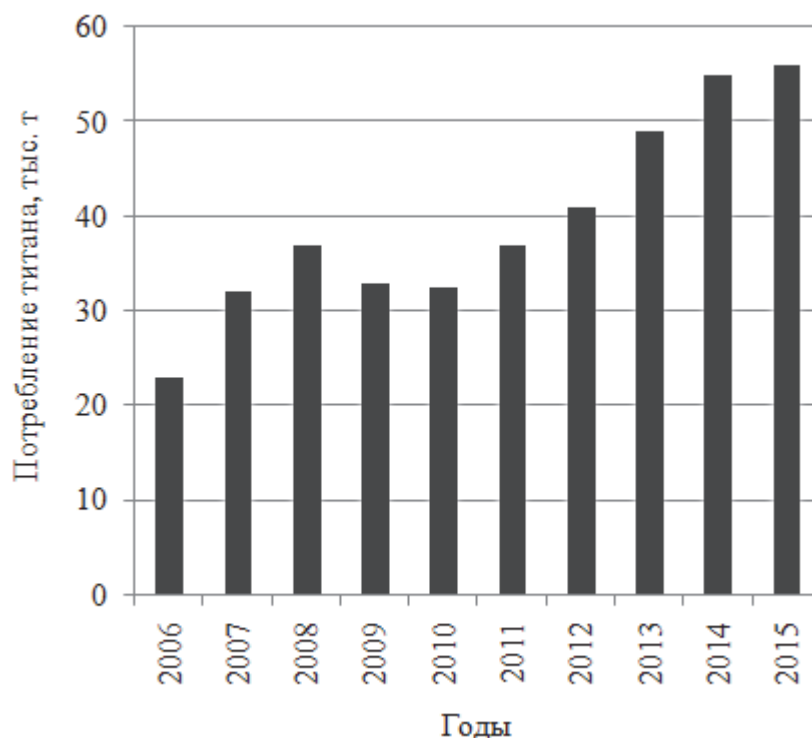


Рис. 1. Применение титана в коммерческом самолетостроении [13].

Снижение массы, в том числе, движущихся деталей двигателя приводит к снижению инерционных нагрузок на сопрягаемые детали. Так, только из-за уменьшения массы шатуна снижаются массы поступательно движущихся и вращающихся частей, что может привести к снижению инерционных нагрузок, боковых нагрузок со стороны поршня на цилиндр, а также нагрузок на коленчатый вал и шатунный подшипник и, как следствие, к более высокому ресурсу этих деталей. Снижение массы шатуна может способствовать уменьшению размеров противовесов коленчатого вала, что приводит к уменьшению размеров картера и габаритных размеров двигателя. Это преимущество имеет немалое значение для воздушных судов с ограниченным пространством для силовых установок, таких как спортивные или учебно-тренировочные самолеты.

С другой стороны, к таким высоко нагруженным деталям двигателей, как шатун, предъявляются требования по высокой прочности и сопротивлению усталостному разрушению. Этими свойствами обладают многие стали и сплавы на основе титана. К преимуществам титановых сплавов можно отнести повышенную удельную прочность и коррозионную стойкость по сравнению со сталями. Одним из главных недостатков титановых сплавов является более низкая технологичность при обработке резанием в отличие от сталей.

2. Требования к сплавам

В существующем флоте воздушных судов малой авиации дизельные двигатели применяются в различных условиях, которые характеризуются продолжительностью и уровнем нагрузки, а также частотой перемены нагрузки. Так, применяющиеся на регулярных рейсах двигатели, к примеру, на пассажирских или транспортных рейсах, работают большую часть времени на экономных режимах и должны иметь большой ресурс. В двигателях воздушных судов, принимающих участие в спортивно-пилотажных мероприятиях, перемена нагрузки происходит гораздо чаще, также повышается продолжительность высоких нагрузок, но экстремальные условия такого рода могут быть компенсированы относительно малым ресурсом. В первом случае работающие при знакопеременных нагрузках детали двигателей, в т.ч. шатуны, должны иметь достаточно высокое сопротивление к многоцикловой усталости, во втором — к малоцикловой.

Принимая во внимание объем серии деталей двигателей, а также доступность того или иного титанового сплава на рынке, может быть выявлена потребность в различных сплавах и/или различной технологии производства шатунов в зависимости от назначения двигателей. Так для низконагруженных деталей может оказаться достаточным применение отожженных прутков в качестве заготовок деталей, а для высоконагруженных может потребоваться закалка с последующим старением, что относится к упрочняемым термической обработкой сплавам. Даже применение различных режимов термообработки (температура, выдержка, среда охлаждения) влияет на необходимые свойства одного и того же сплава. Например, при повышении прочности может снизиться пластичность и ударная вязкость. Поэтому при проектировании шатунов выбор технологии, в том числе и режимов термообработки, необходимо связывать с требованиями к эксплуатационным режимам этих деталей, а также с объемом серии изделий для выпускаемых или эксплуатируемых авиационных двигателей.

3. Обзор, сравнение и выбор титановых сплавов

Существует широкий ряд сплавов с α -, псевдо- α -, $\alpha+\beta$ -структурой, удовлетворяющих требованиям средней и высокой прочности при температурах эксплуатации до 400°C. Это сплавы систем Ti–Al–Mo–Cr (BT3–1, BT15), Ti–Al–Sn (BT5–1), Ti–Al–Sn–Zn–Mo (Ti–6242), Ti–Al–V (BT6, Ti–64).

Стоит отметить, что наряду с характеристиками прочности сплавов система легирования и, как следствие, технологические свойства сплавов требуют отдельного внимания, т.к. эти свойства непосредственно влияют на выбор технологических процессов производства изделий, в данном случае шатунов. Так, среди сплавов с $\alpha+\beta$ -структурой хорошо деформируются в горячем состоянии сплавы ВТ6, ВТ16, ВТ23, Ti-64, IMI-550, IMI-551, Corona 5, SP-700 [1]. Поэтому при выборе технологии изготовления заготовок шатунов из этих сплавов можно отдать предпочтение обработке давлением. В том числе содержание легирующих элементов и примесей в сплаве оказывает влияние на механические свойства. Например, повышенное содержание кремния в жаропрочных сплавах ВТ8 и ВТ9 также повышают их жаропрочность [5], хотя повышают чувствительность к частоте смены тепловых нагрузок. Повышенное содержание кремния, в т.ч. в высокопрочных сплавах, применяющихся до 400 °С (например, ВТ3-1), может увеличить чувствительность к локальным концентраторам напряжений из-за снижения пластичности [2], что ужесточает требования к чистоте или дискретности механически обрабатываемых поверхностей.

Также при выборе технологии изготовления изделий должна быть учтена высокая склонность титана к окислению во время обработки заготовок или полуфабрикатов при температурах свыше 500 °С, что происходит при обработке давлением или при термической обработке. Это свойство приводит к образованию альфированного (газонасыщенного) слоя на поверхности штамповок или полуфабрикатов, подвергающихся термической обработке. Альфированный слой вызывает охрупчивание поверхности, снижая ее пластичность, тем самым снижая сопротивление усталостному разрушению.

В [3] приводятся сведения о проявлении титановыми сплавами высокой чувствительности к параметрам и условиям производственных процессов. Например, обработанные давлением поковки и штамповки из сплавов с $\alpha+\beta$ -структурой обладают лучшими свойствами, чем полуфабрикаты, прошедшие только термическую обработку в том же температурном интервале, что и при обработке давлением, несмотря на достижение желаемой структуры.

Сплавы с α -, псевдо- α -структурой применяются в основном в качестве конструкционных сплавов с высокой технологичностью (например, ОТ4, ОТ4-1, АТ3), в т.ч. и в холодном состоянии, а также сплавов со средним уровнем прочности (ВТ5-1, Ti-5Al-2,5Sn) и жаропрочных сплавов (ВТ18у, Ti-6242S, IMI-417, IMI-679, IMI-829, IMI-834) [1].

Из широко используемых в настоящее время высокопрочных титановых сплавов можно выделить большую группу сплавов с $\alpha+\beta$ -структурой, обладающих хорошими механическими свойствами. Предел прочности этих сплавов лежит в пределах 950–1570 МПа при температурах эксплуатации до 400 °С, что даже превосходит уровень предела прочности применяемых для изготовления шатунов сталей. К преимуществам этих сплавов относится также, в основном, более высокая технологичность при обработке давлением в горячем состоянии, чем у сплавов с α -структурой. Также большое влияние на выбор сплава может оказывать объем его производства в мире: только на сплав ВТ6 (Ti–64) приходится 50 % мирового производства [1, 6].

4. Механические свойства сплавов

Среди применяемых в настоящее время материалов для производства шатунов высокофорсированных дизельных двигателей, в т.ч. и в промышленности наземного транспорта, в подавляющем большинстве применяются стали [9, 10, 12]. При этом отдается предпочтение достаточному уровню прочности, исходя из эксплуатационных нагрузок и их продолжительности, и технологичности стали при разделении крышки и тела шатуна способом разрыва, что по одному из главных требований в автомобильной промышленности приводит к снижению периодов обработки деталей и увеличению объема серии [10, 11]. Это среднеуглеродистые стали, такие как C70S6 и 36MnVS4.

Также в качестве материала для шатунов, применяющихся в высокофорсированных спортивных и мелкосерийных двигателях в авто- и мотоиндустрии, используются титановые сплавы. Наибольшая доля приходится на сплав Ti–6Al–4V (ВТ6).

Как видно из таблиц 1 и 2 прочностные характеристики титанового сплава ВТ6 и применяемых сталей сопоставимы, в тоже время плотность сплава ВТ6 значительно ниже, чем у сталей.

Таблица 1

Физические свойства сплавов [2, 5, 12]

Сплав	ρ , кг/м ³	Е, ГПа	$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	
			20 – 100°С	20 – 200°С
C70S6	7780	210	–	–
36MnVS4	7670	213	11,1	12,1
ВТ6	4430	110	8,4	8,7

Таблица 2

Механические свойства сплавов [7, 9, 10, 12]

Сплав	Вид полуфабриката / термическая обработка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	σ_{-1} , МПа
C70S6	–	550	975	10	320
36MnVS4	Штамповка / контролируемое остывание после деформирования	750	985	12	430
BT6	Штамповка / отжиг	875	983	14	490

При проведении сравнения удельных характеристик прочности этих материалов (таблица 3) можно сделать вывод, что титановый сплав BT6 обладает гораздо лучшими удельными характеристиками, чем приведенные стали.

Таблица 3

Удельные характеристики сплавов

Сплав	$E/\rho \cdot 10^3$, ГПа·м ³ /кг	$\sigma_{0,2}/\rho \cdot 10^3$, МПа·м ³ /кг	$\sigma_B/\rho \cdot 10^3$, МПа·м ³ /кг	$\sigma_{-1}/\rho \cdot 10^3$, МПа·м ³ /кг
C70S6	26,99	70,69	125,32	41,13
36MnVS4	27,38	80,83	128,42	56,06
BT6	24,83	197,52	221,90	110,61

При дальнейшем сравнении свойств сплавов видно, что из-за меньшего модуля упругости шатун из титанового сплава BT6 имеет меньшую изгибную и крутильную жесткости при одинаковых геометрических параметрах конструкции стального шатуна, предполагая одинаковую статическую прочность шатунов из стали и титанового сплава, а также большее отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, что приводит к повышенному износу инструмента во время обработки резанием [8] и может снизить параметры чистоты обработанных поверхностей шатунов. Но подобного рода сравнения целесообразно проводить только совместно с рассмотрением характеристик двигателя и учетом всех технологических процессов при производстве шатунов и особенностей их эксплуатации в авиационных двигателях.

5. Технология изготовления деталей

Выбор заготовок, а именно способ их производства, ограничивается горячекатаными прутками и плитами с последующим заводским отжигом. А далее, в зависимости от дальнейшей технологии производства шатунов, может быть применено калибрование прутков для последующей обработки давлением с целью получения меньшей шероховатости необрабатываемых поверхностей или точение.

Для дальнейшего производства шатунов в настоящее время применяется механическая обработка полуфабрикатов из плит или поковок без образования необрабатываемых поверхностей, т.е. требующей полной механической обработки всех поверхностей шатуна. Последний способ вводится для увеличения коэффициента использования материала и, как следствие, снижения себестоимости изделия. Но эти способы нашли широкое применение пока только в авто– и мотоспорте. Также для изготовления заготовок шатунов может быть применена обработка давлением (объемная штамповка), при которой поверхности, к примеру, на теле шатуна, не нуждаются в механической обработке. Хотя подобный способ не получил широкого распространения, он используется в производстве шатунов из титановых сплавов для поршневых компрессоров. Для предотвращения охрупчивания поверхности штамповок из-за образования на ней альфированного слоя после обработки давлением стоит применять пескоструйную, а затем химическую или электро–химическую обработку (электролитическая полировка). Прошедшие такую обработку образцы из сплава ВТ6 обладают большим пределом выносливости, чем прошедшие только термическую обработку [1, с. 189, 205].

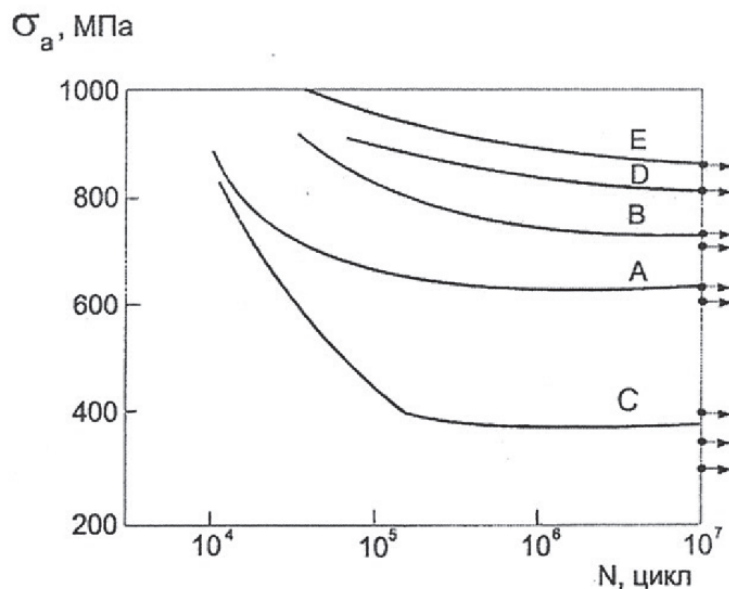


Рис. 2. Кривые усталостной прочности сплава Ti–6Al–4V с тонкой равноосной структурой ($R = -1$) [1]. Состояние поверхности: А – электролитическая полировка; В – дробеструйное упрочнение; С – В + 500 °С, 1 ч; D – С + снятие поверхностного слоя глубиной 20 мкм; Е – В + снятие поверхностного слоя глубиной 20 мкм.

Как было отмечено ранее, требуемые механические свойства материала изделия определяют среди прочих параметры термической обработки. Так, например, для сплава ВТ6 рекомендован отжиг [1]:

- рекристаллизационный (для повышения значения вязкости разрушения, сопротивления коррозионному растрескиванию и уменьшения скорости роста трещин),
- двойной (для повышения вязкости разрушения и сопротивления усталости),
- бета-отжиг (для повышения характеристик вязкости разрушения и сопротивления росту трещин, но при этом снижается пластичность и сопротивление усталости),

или упрочняющая термическая обработка:

- закалка до $\alpha+\beta$ -области + старение (для наиболее высокой прочности, хотя при этом снижаются пластичность, вязкость разрушению и сопротивление коррозионному растрескиванию),
- закалка до $\alpha+\beta$ -области + перестаривание (для обеспечения промежуточной прочности и повышения пластичности и трещиностойкости по сравнению с высокопрочным состоянием),

- закалка до β -области + перестаривание (для обеспечения подобных свойств при бета-отжиге, но при улучшенных характеристиках сопротивления усталости).

Помимо свойств материала основной массы изделия (седрцевины) их долговечность в большой степени зависит от качества и состояния поверхности, обусловленной технологическими процессами [6]. Для повышения долговечности изделий из сталей, алюминиевых и титановых сплавов в авиации широко применяется поверхностное упрочнение, которое повышает выносливость, а также частично или полностью устраняет влияние на циклическую прочность конструктивных концентраторов напряжений, покрытий, коррозионных сред [6]. В технологии изготовления шатунов из титановых сплавов для высокофорсированных двигателей наземного применения, в основном, авто- и мотоспорта, поверхностное упрочнение (дробеструйное упрочнение) является неотъемлемой частью технологических процессов производства, повышающее усталостную прочность сплавов. Поэтому применение этого способа при изготовлении шатунов из титановых сплавов для высокофорсированных авиационных дизелей может дополнить технологию производства как необходимый способ упрочнения, т.к. эта необходимость может быть вызвана свойствами применяемого сплава, а также условиями эксплуатации.

6. Заключение

По основным тенденциям применения материалов в авиации и исходящих из них требований, к примеру, удельная статическая и усталостная прочность, можно предположить, что замена материала для шатунов высокофорсированных авиационных дизелей из применяемых в настоящее время сталей на титановые сплавы с достаточными механическими свойствами может являться целесообразной. При этом взвешенную оценку целесообразности применения титановых сплавов необходимо проводить с рассмотрением технологии изготовления шатунов или ее возможных и альтернативных этапов, которые в последствии могут потребовать экспериментальных исследований и обоснований как свойств материала, так и прочностных характеристик конструкции с дальнейшим решением о применении титановых сплавов.

7. Список литературы

1. Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. Справочник. М.: ВИЛС, 2000. 316 с.

2. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 640 с.
3. Matthew J. Donachie, Jr. Titanium: a technical guide.— 2nd ed. p. cm. ASM International. The Materials Information Society. 2000. 381 pp.
4. ОСТ 1.90013–81. Сплавы титановые. Марки. М., 1981. 4с.
5. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для вузов / Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: "МИСИС", 2001. 416 с.
6. Современные технологии авиастроения / Под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Ливанова. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.
7. Режимы изотермического деформирования и их влияние на реологические свойства, структуру и механические характеристики заготовок из сплава ВТ6. Технол. рекомендации: ТР 1.4.2018: Утв. НИАТ: Введ 01.10.91 / НИИ технологии и организации производства. М. : НИАТ, 1992. 15 с.
8. Технология производства титановых самолетных конструкций: монография / А.Г.Братухин, Б.А.Колачев, В.В.Садков и др. М. : Машиностроение, 1995. 443 с.
9. Halbwarm-Präzisionsschmieden eines Pleuels mit offenem Steg // BAF, 2008, Ausgabe 2, s. 2–3.
10. Potenziale massivumgeformter Bauteile // Schmiede-Journal. 2005. März. S.11.
11. Verbesserungen bei bruchtrennfähigen Pleuelstangen durch neuen mikrolegierten Stahl // MTZ. 2000, April. S. 244–245.
12. Massereduzierung an Bauteilen des Kurbeltriebs // MTZ. 2006, April. S. 254–261.
13. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС МАТИ, 2009. 520 с.