

ПРИМЕНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В АВТОМОБИЛЬНОЙ И МОТОЦИКЛЕТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Национальный авиационный университет, LSD-Tuning@ukr.net

Титановые сплавы приобретают всё большего использования в производстве деталей автомобилей и мотоциклов. В работе рассмотрены вопросы замены традиционных конструкционных сплавов титановыми сплавами, которые улучшают производительность автомобилей и мотоциклов, а также их топливную экономичность, что в свою очередь, способствует решению проблемы защиты окружающей среды.

Введение. Титан и его сплавы широко используются в авиации и космической отрасли, а также в других областях, в которых титан, благодаря сочетанию своих физических и механических свойств, коррозионной стойкости и биосовместимости, имеет преимущества перед другими металлами. В зависимости от непосредственного применения, титановые сплавы конкурируют с никелевыми, нержавеющей сталью и циркониевыми сплавами.

В течение последних 20 лет, наблюдается ежегодный рост применения титановых сплавов в автомобильной и мотоциклетной промышленности в различных системах и механизмах, в том числе и узлах трения. Так, около 800 т технически чистого (ТЧ) титана было использовано в 2003 году в автомобильной и мотоциклетной промышленности Японии, в основном при производстве выхлопных систем для мотоциклов [1]. Надёжность деталей из титановых сплавов была успешно проверена в течение многих десятков лет на гоночных автомобилях, подготовленных по жёстким требованиям для участия в автоспорте.

Титановые сплавы успешно применяются при производстве таких деталей двигателя спортивных автомобилей как: коленчатые валы, впускные и выпускные клапаны, коромысла клапанов, пружины клапанов, сухари, рычаги клапанов, шатуны. Также титан используется при изготовлении нажимных дисков и картера сцепления, рычагов подвески, пружин подвески, соединительных тяг,

передних и задних осей, выхлопной системы, рулевых тяг, колёсных дисков, втулок, гаек, торсионных рычагов, различных крепёжных элементов, коррозионно-стойких и энергопоглощающих элементов каркаса кузова, боковых зеркал и др. (табл. 1).

Таблица 1

Титановые сплавы применяемые в автомобильном производстве

Сплав	$\sigma_{\text{рас}}$, МПа	$\sigma_{\text{уст}}$, МПа	σ , %	Область применения
Технически чистый титан марки CP Grade 1	~300	~250	30	Глушитель, уплотнительная шайба
Технически чистый титан марки CP Grade 2	~450	~380	22	Выхлопные системы, элементы дизайна
Ti-6Al-4V	~1050	~950	10	Шатуны, впускные клапаны, ступицы колёс
Ti-6Al4Sn4Zr1Nb1Mo0,2Si ^{a)}	—	1150	4	Выпускные клапаны
Ti-4,5Fe6,8Mo1,5Al ^{б)}	1290	1380	10	Пружины подвески, клапанные пружины, болты
γ Ti-46,8Al1Cr0,2Si (литой)	525	410	~2	Клапаны, роторы турбокомпрессоров, поршневые пальцы

$\sigma_{\text{рас}}$ – прочность на растяжение;

$\sigma_{\text{уст}}$ – усталостная прочность;

σ – относительное удлинение;

a) упрочнённый сплав с 5 % TiB (модуль упругости ~ 150 ГПа);

б) недорогой β -сплав (Low-Cost-Beta).

Многолетний опыт использования титановых сплавов [1–3], показывает, что наиболее целесообразно их применение для деталей высоконагруженных двигателей (рекомендованы сплавы средней прочности и жаропрочные), несущей конструкции автомобилей (сплавы средней прочности) и ходовой части (сплавы средней прочности и высокопрочные сплавы).

Использование титановых сплавов в автомобилях и мотоциклах обеспечивает ряд таких преимуществ как: снижение массы деталей, совершающих возвратно-поступательное движение, уменьшение нагрузки на коленвал, уменьшение бокового давления на поршень, повышение оборотов двигателя, существенное увеличение мощности двигателя, снижение уровня шума и расхода горюче-

смазочных материалов, повышение надёжности и долговечности ряда деталей возвратно-поступательной системы. К примеру, титановые *шатуны*, применяемые в 6-цилиндровых двигателях (центрального расположения) с V-образным расположением цилиндров спортивных автомобилей Honda NSX, обеспечивают повышение частоты вращения на 700 об/мин по сравнению со стальными шатунами и снижают на 30 % массу шатунов.

Люксовое отделение японской компании «Toyota» – «Lexus» в 2010 году официально представило свой первый серийный суперкар Lexus LFA (всего 500 экземпляров) с двигателем V10 (с индивидуальными дроссельными заслонками у каждого цилиндра и системой смазки с сухим картером). На данном 4,8 л двигателе (560 л.с. и 480 Н·м) установлены титановые клапаны и шатуны. В работе над двигателем купе Lexus LFA принимали участие мотоциклисты фирмы Yamaha [4].

Также, шатуны из титановых сплавов используются в автомобилях Ferrari, Porsche 911 GT3 и мотоциклах Honda (CRF250R, CRF450R), Yamaha (YZ250F, YZ450F, R1), Suzuki (RM-Z250, RM-Z450), Kawasaki (KX250F, KX450F), KTM (KTM250SXF, KTM450SXF), Ducati и др.

Детали изготовленные из формозапоминающих титаново-никелевых (Ti/Ni) сплавов могут изменять форму при механическом воздействии, но принимают свою первоначальную форму при нагревании. В Японии в автомобильной промышленности половина титановых деталей изготавливается из формозапоминающих сплавов. Известно, что фирма «Kanto Special Steel» (Япония) разработала карбюратор с использованием Ti/Ni сплавов. *Воздушная заслонка*, в нём изменяет свою форму в зависимости от изменений температуры.

С начала промышленного производства титана и титановых сплавов и до настоящего времени, этот материал вызывает интерес у производителей автомобилей и мотоциклов из-за своей высокой удельной прочности, высокой ударной вязкости (сохраняемой до минус 253 °C), отличной коррозионной стойкости и значительной прочности при повышенных температурах. Наибольший энтузиазм по поводу будущего титановых сплавов в автомобилестроении было продемонстрировано подразделением «Motorama» американской корпорации «General Motors» (GM) в мае 1956 года (титан впервые

был использован в автомобильной промышленности) с выпуском автомобиля Firebird II Titanium (рис. 1). Этот экспериментальный четырёхместный автомобиль, содержал целый спектр деталей из титановых сплавов, в котором даже кузов был изготовлен из титана, выдерживающий температуру в 493 °С. На данном автомобиле был установлен газотурбинный двигатель Whirlfire GT-304, с мощностью 200 л.с.



Рис. 1. Автомобиль GM Firebird II Titanium

Из-за своей высокой стоимости титановые сплавы, изначально стали использоваться в технике для автомобильного (раллийные и гоночные автомобили Formula 1, Nascar, FIA GT и др.) и мотоциклетного спорта, спортивных автомобилях (Ferrari, McLaren, Porsche) и мотоциклах высокого класса (Yamaha, Honda, Suzuki, Kawasaki, KTM, Ducati).

Так, к примеру, в 70-е годы в Англии было организовано производство титановых шатунов для гоночных автомобилей с объёмом цилиндров 350 и 500 см³. При этом было достигнуто уменьшение массы шатуна на 30 %, что привело к снижению инерционных нагрузок кривошипно-шатунного механизма, увеличению мощности двигателя на 12 л.с. и экономии горюче-смазочных материалов [2].

На рис. 2 показано сравнение ряда механических свойств (предел текучести ($\sigma_{0,2}$, полосатые столбцы), усталостная прочность ($\sigma_{\text{уст}}$, точечные столбцы), модуль Юнга (E , серые столбцы), по отношению к плотности) наиболее часто используемого $\alpha+\beta$ -титанового сплава Ti-6Al-4V, с термически обработанной сталью 34CrMo4 повышенной прочности, высокопрочным AlZnMg-сплавом Al7075, и высокопрочным кованным магниевым сплавом AZ80. Приведенные сплавы по своим свойствам, хорошо подходят для деталей автомобилей и мотоциклов.

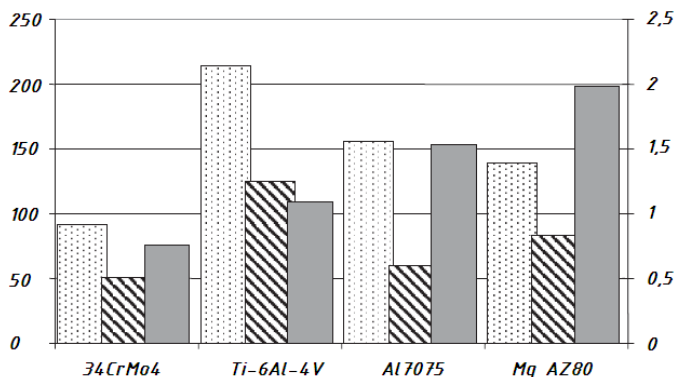


Рис. 2. Механические свойства ковanej стали, $\alpha+\beta$ - титанового сплава, высокопрочного алюминиевого сплава и высокопрочного ковального магниевого сплава: $\square$ – $\sigma_{уст}/\rho$; $\square$ – $\sigma_{0.2}/\rho$, МПа·см³/г; $\blacksquare$ – $\sqrt[3]{E}/\rho$, ГПа¹/³·см³/г [3]

Клапанный механизм двигателя представляет собой перспективную область применения титановых сплавов в массовом производстве (рис. 3).

Титановые *пружины клапанов* меньше по своей массе и размерам, чем стальные пружины и имеют такие же рабочие характеристики, поэтому широко используются в авто- и мотоспорте. При производстве пружин используют очень дорогую, тонкую проволоку диаметром 2-3 мм из β -титановых сплавов.

Так, при использовании титановых пружин клапанов, в сочетании с обычными клапанами из стали, можно достигнуть снижения веса примерно на 40 %. А в сочетании с *облегченными клапанами* (Mitsubishi, Toyota, Nissan Infinity Q45 [3]), сокращение массы деталей достигает 70 %. Это приводит к снижению инерционных нагрузок, действующих на пружины клапанов (что особенно важно для высокооборотистых бензиновых двигателей) и соответственно, уменьшению потерь на трение в клапанном механизме (которое составляет приблизительно 20-25 % от общего трения в двигателе), что существенно повышает КПД двигателя, снижает шум и расход топлива.

К материалам для производства клапанов предъявляются чрезвычайно высокие требования: из-за высокой тепловой нагрузки от выхлопных газов (с температурой до 900 °С), тарелка клапана претерпевает деформацию от циклического контакта с седлом клапана. Стержень клапана может стать предметом случайного воз-

никновения изгибающих нагрузок. Возможной альтернативой применяемым в настоящее время сталям являются γ алюминиды титана и жаропрочные сплавы титана, которые позволяют снизить вес клапана на 40–50 %, что приводит к увеличению частоты вращения на 500 об/мин и снижению расхода топлива [3].

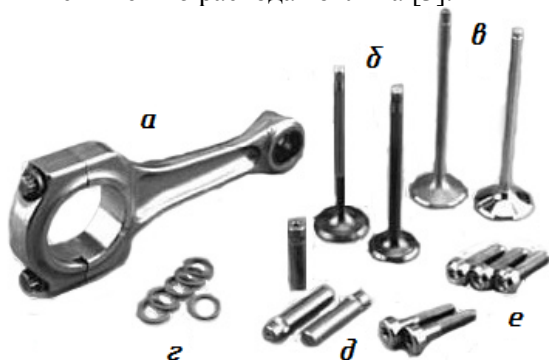


Рис. 3. Примеры деталей из титановых сплавов, применяемых в производстве автомобилей и мотоциклов: *а*) шатун (Ti-6Al-4V, Ducati); *б*) впускной клапан (Ti-6Al-4V), выпускной клапан (псевдо α -сплав упрочнённый TiB-частицами); *в*) клапаны из γ TiAl без покрытия/с покрытием; *г*) уплотнительные кольца труб давления тормозной системы (ТЧ титан Grade 1, Volkswagen); *д*) поршни тормозных суппортов (ТЧ титан Grade 2, Mercedes-Benz); *е*) винты колёсного обода (Ti-6Al-4V, Ronal и BBS)

Крупнейшая японская автомобилестроительная компания «Toyota Motor Corporation» разработала облегчённые клапаны из титановых сплавов (рис. 3), причём для производства впускных клапанов достаточно характеристик сплава Ti-6Al-4V. Для изготовления более подверженных термическим напряжениям выпускных клапанов, применяется псевдо α -сплав Ti-6Al-4Sn-4Zr-1Nb-1Mo-0,2Si-0,3O, матрица которого упрочняется специально разработанным порошком с TiB частицами (табл. 1). При производстве этих клапанов TiH₂ и TiB₂ порошки смешиваются с порошком лигатуры, уплотняются и спекаются в условиях вакуума при температуре 1300 °С, с образованием TiB-частиц. Далее, используя метод горячей экструзии при температуре 1200 °С, из прутков изготавливаются клапаны. Заготовки клапанов термообрабатываются, проходят чистовую обработку и окисляются для улучшения сопротивления абразивному износу. Благодаря этой технологии производства, формируется упрочнённый сплав с 5 % объёмной долей TiB частиц в

окружающей мелкозернистой duplex микроструктуре с размером зерна около 25 мкм. Преимущество упрочнённых TiV частицами клапанов заключается в улучшении механических свойств при комнатной и высоких температурах с одновременным увеличением модуля Юнга до 150 ГПа. Такие клапаны с тонкими седлами были впервые использованы в серийном производстве шестицилиндрового двигателя модели Toyota Altezza в 1999 году [3].

В немецкой автомобильной промышленности, для эффективного производства облегчённых клапанов, большие надежды уделяются использованию сплавов на основе интерметаллида титана (γ -фаза) TiAl (рис. 3) [3]. Преимущества этого сплава заключаются в его меньшей плотности, высокой жаропрочности (до 850 °C), хорошей стойкости к окислению, высоком сопротивлении ползучести и коэффициенте термического расширения ($\alpha = 11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). К недостаткам данного сплава относятся: низкая пластичность ($\delta = 0,5\text{--}1,5 \%$) при комнатной температуре, трудности при механической обработке, и тот факт, что расходы на производство клапанов оправдываются только по литейным технологиям.

Следует отметить, что поверхности *титановых чашек клапанов*, которые также в основном используются в гоночных автомобилях, из-за своей низкой износостойкости, требуют дополнительного нанесения износостойчивых покрытий [5–8].

С 2000 года корпорация «Mitsubishi Motors» (MMC) выпускает точно литые роторы турбин из γ TiAl сплавов для модели Lancer [3]. Ещё одним преимуществом титановых сплавов перед другими конструкционными материалами является то, что в нём редко наблюдается точечная и межкристаллитная коррозия. Поэтому, в целях защиты от коррозии, *уплотнительные шайбы* штуцерных разъёмов тормозной магистрали всех автомобилей Volkswagen с алюминиевыми тормозными суппортами с 1998 года, были заменены на титановые (рис. 3). Чтобы шайбы не деформировались при затягивании гайки, по оптимальному решению, был выбран ТЧ титан (Grade 1s). В 1998 году, также по причинам защиты от коррозии, компания «Mercedes-Benz» начала производить *поршни тормозных суппортов* для модели S-класса (рис. 3) из ТЧ титана. С той же целью защиты от коррозии, а также, снижения веса, и благодаря низкой теплопроводности, *крепёжную пластину тормозных колодок*, рекомендуется изготавливать из ТЧ титана (Grade

4). Сведение к минимуму таких «неподдрессоренных масс» как колёса, детали тормозной системы, кронштейны колёс, подшипники колёс, оси подвески и т.д., непосредственно влияет на комфорт. С минимальными конструктивными изменениями, такие кованые компоненты шасси, как *поворотные кулаки, кронштейны колёс, рычаги подвески, ступицы колёс* могут быть просто заменены на такие $\alpha+\beta$ -сплавы, как Ti-64 или Ti-62222.

Эффективного снижения (на 40-50%) веса *пружин подвески* можно достигнуть, за счёт использования высокопрочных титановых β -сплавов, которые обладают достаточным запасом усталостной прочности. Немецкий автомобилестроительный концерн «Volkswagen AG» (VAG), начал первым в мире использовать титановые сплавы при производстве задних пружин подвески на модели Lupo FSI в 1999 году. Для этого проекта, был выбран β -сплав низкой стоимости Ti-4,5Fe6,8Mo-1,5Al.

Рост использования титановых сплавов при изготовлении *выхлопных систем*, начался 12 лет назад с мотоциклов. В настоящее время, некоторые модели высокопроизводительных спортивных мотоциклов Honda, Yamaha, Kawasaki, и Suzuki оснащены титановыми глушителями и/или выхлопными трубами [1; 3]. За счёт применения сплавов титана в автомобильной выхлопной системе, достигается снижения снаряжённой массы автомобиля на 7–9 кг (в зависимости от двигателя). Дополнительным преимуществом при использовании титана, является значительное увеличение срока эксплуатации автомобилей и мотоциклов, а также снижение выбросов токсичных веществ с отработавшими газами. На сегодня, хорошо изучены трубогибочные методы и налажено производство деталей выхлопных систем из титановых сплавов, о чём свидетельствует первое применение данных сплавов в начале 2001 года в серийном автопроизводстве, выхлопной системы для седана Chevrolet Corvette Z06 (C5) с двигателем LS6 V8 (рис. 4).

Сплавы титана могут применяться для тех частей выхлопной системы, в которых температура выхлопных газов не слишком высока. Так, к примеру, при температуре выхлопных газов в зоне выпускного коллектора (в самой горячей точке двигателя), которая может достигать более 900 °С, титан может быть использован только за каталитическим нейтрализатором, где температура отработавших газов для бензиновых двигателей достигает максимума 750-800 °С. В ди-

зельных автомобилях, температура выхлопных газов, значительно ниже и достигает максимум 600 °С в глушителях.



Рис. 4. Титановые детали выхлопной системы Chevrolet Corvette Z06

Область применения титановых сплавов в выхлопной системе, начинается от выхлопных фильтров, турбо- и каталитических преобразователей для усиления процесса полного сгорания топлива и заканчивается устройствами для полной ликвидации выхлопных газов с помощью водородных накопителей.

Также, титан и его сплавы могут частично использоваться как *броневой материал* для бронированных транспортных средств. Хороших результатов можно ожидать от их применения, в виде лёгкой брони и в качестве защиты от осколков, что демонстрирует использование сплава Ti-6Al-4V в американских боевых танках M2A для защиты гусеничной цепи и брони башни [1].

Но, несмотря на то, что титановые сплавы являются уникальными материалами, характеризующимися сочетанием физико-химических и механических свойств их применение во многих случаях, ограничивается из-за низких антифрикционных свойств, их склонности к схватыванию, а также низкой твёрдости поверхности. Поэтому, в настоящее время применение сплавов титана в реальных узлах трения (которые в значительной степени определяют ресурс, надёжность и безопасность функциональных систем) возможно только при наличии износостойких и жаростойких покрытий, наносимых различными методами (газопламенные, плазменные, детонационные покрытия, гальваническое хромирование азотирование, напайка износостойчивых композиций и многослойное электроискровое легирование и др.) [5–8].

Таким образом, видно, что по-прежнему необходимо проведение научно-исследовательских работ по улучшению физико-механических и антифрикционных свойств титановых сплавов. Так как широкое применение сплавов титана до настоящего времени также затрудняется из-за: низкого модуля Юнга (коленчатый вал,

поршневые пальцы) или возможности достижения того же или лучшего преимущества в снижении веса при меньших затратах с использованием алюминия или магния (например, магниевая клапанная крышка Lexus LFA [4]), технических проблем производства и сварки (высокая склонность к росту зерна). Однако внедрение титановых сплавов в серийное производство деталей автомобилей и мотоциклов, а также грузового автотранспорта, даёт прямой экономический эффект.

Выводы. Поскольку в настоящее время многие конструкционные материалы исчерпали свои возможности, и постоянно растёт спрос на топливно-эффективные, безопасные и экологически чистые автомобили и мотоциклы, что в свою очередь, требует снижения веса и одновременного повышения производительности, возникает необходимость использования более дорогих материалов – титана и титаносодержащих сплавов. Несмотря на ограниченное применение титановых сплавов в различных деталях и узлах (табл. 1 и рис. 3) в последние годы, они в состоянии сделать скачок в серийное производство.

Использование сплавов титана, которые обладают рядом преимуществ, по сравнению с другими материалами, помимо снижения инерционных сил, обусловленных в основном массой деталей, и сил трения может способствовать решению различных технических, экономических проблем, и в частности проблемы защиты окружающей среды (сокращения выбросов выхлопных газов). Поэтому, для расширения области применения титана и его сплавов, возникает необходимость разработки и внедрения новых технологий для повышения их антифрикционных, прочностных и жаропрочных свойств.

Список литературы

1. *Kosaka Y.* Newly Developed Titanium Alloy Sheets for the Exhaust Systems of Motorcycles and Automobiles / Yoji Kosaka, Stephen P. Fox, Kurt Faller // JOM, 2004. Vol. 56, № 11. – P. 32–34.

2. *Титановые сплавы в машиностроении* [Б.Б.Чечулин, С.С.Ушков, И.Н.Разуваева, В.Н.Гольдфайн]. – Л., «Машиностроение», 1977. – 248 с.

3. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications* / Edited by Christoph Leyens, Manfred Peters // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. – 513 p.

4. Шевченко А. Л. Lexus LFA [Електронний ресурс]: по даним Toyota Motor Corporation на 2011 г. – Режим доступа к материалам: http://ASmotorsport.at.ua/publ/automotive_industry/Lexus_LFA/5-1-0-10.

5. Киндрачук М. В. Триботехнические свойства плазменных покрытий на титановом сплаве ВТ-22 / М. В. Киндрачук, Э. А. Кульгавый, А. Л. Шевченко, Е. В. Корбут // Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Видавництво НАУ «НАУ-друк», 2008. – Вип. 50. – С. 171–179.

6. Киндрачук М. В. Триботехнические характеристики детонационных покрытий на титановом сплаве ВТ-22 / М. В. Киндрачук, Э. А. Кульгавый, А. Л. Шевченко, А. П. Данилов // Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Видавництво НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип. 51. – С. 111–122.

7. Киндрачук М. В. Механизм износа гетерогенных газотермических покрытий на титановом сплаве ВТ-22 / М. В. Киндрачук, Э. А. Кульгавый, А. Л. Шевченко // Проблемы трибології (Problems of Tribology). – 2011. № 1 (59). – С. 80–87.

8. Кульгавый Э. А. Механизм износа азотированных покрытий на титановом сплаве ВТ6 / Э. А. Кульгавый, М. В. Киндрачук, А. Л. Шевченко // Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 54. – С. 19–30.

Шевченко О.Л. Застосування титанових сплавів у автомобільній та мотоциклетній промисловості // Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55. – С. 198–208.

Титанові сплави набувають все більшого використання у виробництві деталей автомобілів і мотоциклів. У роботі розглянуті питання заміни традиційних конструкційних сплавів титановими сплавами, які покращують продуктивність автомобілів і мотоциклів, а також їх паливну економічність, що в свою чергу, сприяє вирішенню проблеми захисту навколишнього середовища.

Рис. 4, список літ. 8 найм.

Application of titanium alloys in automobile and motorcycle industry

Titanium alloys are increasingly used in the manufacturing of auto parts for both cars and motorcycles. The article deals with the issues of replacing conventional structural alloys with titanium ones, improving cars and motorcycles performance characteristics, as well as with increasing their fuel efficiency, this contributing to solving environmental problems.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2011