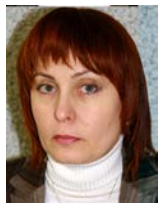


УДК 669.295

Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, С.Б. Белова, Е.Н. Егоров

ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ



Юлия Борисовна Егорова, д.т.н., профессор
МАТИ - Российский государственный технологический
университет имени К.Э. Циолковского
г. Москва, Тел.: 9175568258, E-mail: egorova_mati@mail.ru.



Людмила Васильевна Давыденко, к.т.н., доцент
Московский государственный машиностроительный
университет (МАМИ)
г. Москва, Тел.: 9261167666, E-mail: mami-davidenko@mail.ru.



Светлана Борисовна Белова, к.т.н., доцент
МАТИ - Российский государственный технологический
университет имени К.Э. Циолковского
г. Москва, Тел.: 9104534825, E-mail: sb-belova@rambler.ru.



Евгений Николаевич Егоров, к.т.н., доцент
МАТИ - Российский государственный технологический
университет имени К.Э. Циолковского
г. Москва, Тел.: 9175568258, E-mail: aravir_ene@mail.ru.

Аннотация

Дана характеристика титановых сплавов, приведены существующие и перспективные направления использования титановых сплавов в автомобилестроении.

Ключевые слова: применение титановых сплавов, автомобилестроение, высокая удельная прочность, коррозионная стойкость.

J.B. Egorova, L.V.Davidenko, S.B. Belova, E.N. Egorov

TITANIUM ALLOYS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Dr. Julia B. Egorova¹, e-mail: egorova_mati@mail.ru;
Dr. Lyudmila V. Davidenko², e-mail: mami-davidenko@mail.ru;
Dr. Svetlana B. Belova¹, e-mail: sb-belova@rambler.ru;
Dr. Evgenie. Egorov¹, e-mail: aravir_ene@mail.ru.

¹MATI –Russian Technological University, Russia;

²Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), Russia.

Abstract

In current article you can find characteristic of titanium alloys, present and perspective tendency of using titanium alloys in the area of motor car construction.

Key words: titanium alloys application, motor car construction, high specific strength, corrosion stability.

Титан и его сплавы относятся к числу тех металлических материалов, которые начали производить и применять в промышленных масштабах после второй мировой войны в связи с развитием новой техники, прежде всего авиационной, космической и ракетной. Это обусловлено уникальным комплексом их свойств: малой плотностью, достаточной прочностью, необычно высокой коррозионной стойкостью.

Чистый титан обладает довольно высокой температурой плавления (1668°C); температура его кипения составляет 3169°C . По плотности, равной $4,505 \text{ г/см}^3$ при комнатной температуре, он занимает промежуточное место между железом и алюминием (табл. 1). Титан и титановые сплавы обладают исключительно высоким сопротивлением коррозии, превышающим коррозионную стойкость нержавеющей сталей, что обусловлено образованием на поверхности титана плотной оксидной пленки [1-3]. Титан и его сплавы устойчивы во всех природных условиях: атмосфере, почве, пресной и морской воде, даже в условиях жаркого влажного морского климата. В морской воде за 4000 лет растворился бы слой титана, равный по толщине листу писчей бумаги [1].

Таблица 1

Сопоставление уровня прочности сталей,
титановых и алюминиевых сплавов [1-3]

Класс сплавов		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	ρ , г/см ³	$\sigma_{\text{в}}/\rho$, МПа · см ³ /г
Титановые сплавы	Малопрочные	400-700	4,5-4,55	88,4-154,6
	Средней прочности	700-1000	4,4-4,5	157-225
	Высокопрочные	>1000	4,65-4,75	>213
Алюми- ниевые сплавы	Малопрочные (термически неупрочняемые)	130-300	2,7	48,1-114
	Средней прочности (термически упрочняемые)	350-500	2,85	123-175
	Высокопрочные	>500	2,85	>175
Стали	Углеродистые	300-700	7,8	38,5-89,7
	Малолегированные (малопрочные)	400-850	7,8	89,7-109
	Среднелегированные (средней прочности)	850-1500	7,8	109-192
	Высокопрочные	>1500	7,8	>192

Титан высокой чистоты обладает малой прочностью и высокой пластичностью ($\sigma_b \approx 240$ МПа; $\delta \approx 60$ %; $\psi \approx 70$ %) [1-3]. Для получения заданных механических свойств его легируют алюминием, ванадием, марганцем, молибденом, хромом, железом и некоторыми другими элементами. К настоящему времени разработано несколько сотен опытных композиций и более сотни промышленных сплавов различного назначения с разным уровнем механических свойств [1, 4]. Временное сопротивление разрыву промышленных титановых сплавов может изменяться в пределах от 400 МПа для малолегированных мягких сплавов до 1500-1600 МПа для высоколегированных термически упрочненных сплавов (табл. 1, 2). Титановые сплавы способны сохранять прочностные свойства до сравнительно высоких температур. Наилучшие жаропрочные титановые сплавы могут работать до температур 600-650°C. Вместе с тем некоторые титановые сплавы могут применяться для работы при криогенных температурах, вплоть до температуры жидкого водорода.

Сравнительно небольшая плотность в сочетании с довольно высокими прочностными характеристиками обеспечивает титановым сплавам более высокую удельную прочность (отношение прочностных характеристик к плотности σ_b/ρ) в широком интервале температур по сравнению с алюминиевыми сплавами, сталями и жаропрочными никелевыми сплавами (табл. 1). Именно это обстоятельство является решающим фактором для применения титана в авиационной и аэрокосмической технике.

Однако титан и сплавы на его основе можно применять также в самых различных областях машиностроения [1, 2, 5-7]. Благодаря развитию крупного оптимизированного производства он стал более доступным и экономически выгодным материалом. По мнению журнала «Metall Bulletin Months» (июль, 2003 г.) титан становится все более «домашним», так как значительно возросло его использование для изготовления ювелирных украшений, автомобильных и велосипедных деталей, спортивного инвентаря, кухонных принадлежностей, очков, корпусов часов и зонтов и т.п.

Высокие эксплуатационные характеристики в совокупности с современными технологическими и производственными достижениями открывают широкие возможности для его использования в автомобилестроении [5-11]. Судя по количеству докладов, представленных на Международных конференциях по титану (2003, 2007, 2011 гг.), интерес к титану, как автомобильному материалу, особенно сильно возрос, начиная с 2000-х гг. К 2007 г. объем производства впускных и выпускных титановых клапанов, пружин, шатунов, деталей выхлопных систем исчислялся миллионами штук [6].

К титановым сплавам, используемым в автомобилестроении, предъявляют следующие требования [8]: а) высокая прочность; б) сохранение функциональных характеристик деталей в различных системах автомобиля; в) безопасность, длительный срок эксплуатации деталей; г)

повторное использование титана, обусловленное возможностью переплава деталей после их износа. Надежность автомобильных деталей из титана и его сплавов проверена использованием в авиационной и космической технике, а также применением в гоночных автомобилях [8].

Таблица 2

**Химический состав и механические свойства
отечественных титановых сплавов [1-4]**

Марка сплава	Химический состав	Класс	ПФ*	ТО**	Механические свойства	
					σ_B , МПа	δ , %
1	2	3	4	5	6	7
Малопрочные сплавы						
BT1-00	99,6 Ti	α	л	о	300-450	30
BT1-0	99,5 Ti	α	л	о	400-550	30
OT4-0	1Al-1,5Mn	псевдо- α	л	о	500-650	30
OT4-1	2Al-1,5Mn	" - "	л	о	600-750	20
OT4-1B	3Al-2,5V	" - "	л	о	600-750	≥ 15
ПТ-7М	2Al-2,5Zr	α	т	о	480-680	≥ 20
Сплавы средней прочности						
BT5-1	5Al-2,5Sn	α	л	о	750-900	15
OT4	4Al-1,5Mn	псевдо- α	л	о	700-900	15
OT4B	4,75Al-2,5V	псевдо- α	л	о	700-900	≥ 10
ПТЗВ	4Al-2V	" - "	л	о	700-900	≥ 11
BT6C	5Al-4V	$\alpha+\beta$	л	о	850-1000	12
BT6	6Al-4V	" - "	Пр	о	920-1070	10
BT20	6Al-2Zr-1Mo-1V	" - "	л	о	950-1080	8
BT14	5Al-3Mo-1,4V	" - "	л	о	900-1070	8
BT16	2,5Al-5Mo-4,5V	" - "	Пр	о	850-950	14
Высокопрочные сплавы						
BT18Y	6,5Al-4Zr-0,5Mo-1Nb-2Sn-0,15Si	псевдо- α	Пр	о	950-1150	10
BT8	6,5Al-3,5Mo-1,3Sn-1,3Zr-0,2Si	$\alpha+\beta$	Пр	о	1000-1200	8
BT9	6,5Al-1,5Zr-3Mo-0,3Si	" - "	Пр	о	1000-1250	7
BT3-1	6Al-2,5Mo-1,5Cr-0,5Fe-0,3Si	" - "	Пр	о	1000-1200	10
BT25Y	6,5Al-3,8Mo-3,8Zr-2Sn-0,8W-0,3Si	$\alpha+\beta$	Пр	о	1050-1250	10
BT23	5,5Al-2Mo-4,5V-0,3Cr-0,6Fe	" - "	л	з+с	1400	5
BT22	5,5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	псевдо- β	Пр	о	1050-1300	8
BT22И	2,5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	" - "	Пр	о	1000-1250	12
BT19	3Al-5,5Mo-3,5V-5,5Cr-1Fe	" - "	л	з+с	1400	7
BT32	2,5Al-8,5Mo-8,5V-1,2Fe-1,2Cr	" - "	л	з+с	1350	8
BT35	15V-3Cr-3Sn-3Al-1Mo-1Zr	" - "	л	з+с	1200-1400	6

Примечания: ПФ* - полуфабрикат: л – лист; пр – прутки; ТО** - термическая обработка: о – отжиг; з+с – закалка + старение.

В табл. 2 приведены наиболее характерные механические свойства различных отечественных титановых сплавов, применение которых возможно в автомобилестроении. По данным исследований, проведенных в Центральном научно-исследовательском автомобильном и автомоторном институте (НАМИ), Научно-исследовательском институте автотракторных материалов (НИИАТМ), Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) и Научно-исследовательском институте титана, для деталей автомобилей и двигателей рекомендованы следующие титановые сплавы [10, 12]: для несущих конструкций автомобилей — сплавы средней прочности марок ОТ4-1; ВТ5-1, ОТ4, ВТ5, ВТ6; для ходовой части автомобилей — сплавы средней прочности и высокопрочные сплавы марок ВТ6, ВТ3-1, ВТ8, ВТ5-1, ВТ14, ВТ15, ВТ16; для деталей двигателей — высокопрочные и жаропрочные сплавы марок ВТ3-1, ВТ8, ВТ14, ВТ15, ВТ16, ВТ18У.

Помимо серийных сплавов, активно разрабатывают новые титановые сплавы автомобильного назначения. К ним, в частности относится жаропрочный сплав системы Al-Mo-Zr-Si-Y, специально разработанный для изготовления клапанов двигателя [13]. В ВИАМ разработана концепция создания экономнолегированных титановых сплавов на основе системы Ti-Fe-O-N [14]. Новый сплав Ti-1,5Fe-0,49O-0,05N имеет высокий комплекс механических свойств ($\sigma_b=1000$ МПа, $\delta=20\%$), обладает высокой коррозионной стойкостью и может применяться в автомобилестроении.

В табл. 3 приведены существующие и перспективные направления использования титановых сплавов для изготовления деталей автомобиля [5, 6, 8]. Применение высокопрочных титановых сплавов позволяет повысить мощность автомобильных двигателей из-за уменьшения массы деталей возвратно-поступательных систем. Изготовление шатунов из титановых сплавов приводит к снижению на 30% нагрузки на шатунные подшипники, что значительно повышает их надежность и долговечность [5, 8]. Титановые шатуны, применяемые в двигателях спортивных автомобилей Honda NSX V6, обеспечили повышение оборотов на 700 об/мин по сравнению со стальными шатунами и снизили на 30% массу деталей [5].

Применение титановых сплавов в автомобилях позволяет сделать их более экологически чистыми благодаря сокращению количества выхлопных газов при использовании выхлопных фильтров, изготовленных из спеченного титанового порошка, турбо- и каталитических преобразователей для усиления процесса сгорания топлива, устройств для полной ликвидации выхлопных газов с помощью сплавов-накопителей водорода на основе титана [5, 6, 8].

Специфические особенности и необычные функциональные характеристики специальных титановых сплавов существенно расширяют область их использования. Например, алюминиды титана и сплавы на их

основе обладают высокой жаропрочностью, жаростойкостью и сопротивлением износу [15]. Впервые алюминиды титана были использованы для изготовления деталей двигателя гоночного автомобиля Формулы-1 в 2001 году [16]. В Германии в настоящее время этот сплав является одним из основных для изготовления автомобильных клапанов [5, 6].

Таблица 3

Обзор существующих и возможных областей применения титановых сплавов в автомобилестроении [8]

Критерии применения	Титановые сплавы	Область применения
Масса, коррозионная стойкость, жесткость, деформируемость, внешний вид	Технический титан	Теплообменники, системы выхлопных газов, кондиционирования воздуха, радиаторы, конструкционные детали, элементы жесткости, спойлеры
Масса, высокотемпературная прочность, сопротивление окислению, износостойкость, жесткость	$\alpha+\beta$ -сплавы, алюминиды титана	Детали двигателя (клапаны, шатуны, кулачковые валы, болты, кривошипные валы); компоненты трансмиссий (шестерни, валы, сателлиты, болты); компоненты сцепления (корпусы, диски сцепления), пружины клапанов и шасси; системы выхлопных газов, предохранительные диски, втулки, оси, рычаги, инструмент
Масса, высокая прочность, пружинные характеристики, деформируемость в холодном состоянии	β -сплавы	Пружины клапанов, пружины шасси
Жаропрочность	Алуниниды титана	Турбонагреватель
Масса, коррозионная стойкость	Сплавы системы титан-ниобий	Титановые крепления с пластиком
Эффект запоминания формы	Сплавы системы титан-никель	Детали управления (пружины) для распределения масла в автоматических трансмиссиях, системы кондиционирования воздуха
Топливные баки малых объемов и массы	Сплавы-аккумуляторы водорода, сплавы систем титан-железо, титан-марганец	Топливные баки (нулевая эмиссия)

Сплав титан-ниобий имеет хорошую способность к холодной деформации, высокое сопротивление коррозии; из него можно изготавливать детали крепежа для соединения титана с пластиками и армированным углеродным волокном [8].

Из сплавов с памятью формы на основе никелида титана TiNi изготавливают детали, которые в процессе эксплуатации выполняют повторяющиеся операции под воздействием температурных изменений и

применяются, например, в коммутационных устройствах. В автомобильной промышленности Японии значительная часть титановых деталей изготавливается из таких сплавов. Фирма Kanto Special Steel (Япония) разработала с использованием TiNi-сплавов карбюратор, в котором воздушная заслонка меняет форму в зависимости от температуры эксплуатации [6].

В настоящее время производство титановых сплавов для автомобилестроения особенно интенсивно развиваются в Японии и Китае [5-7, 17]. В 2007 г. безусловным лидером здесь являлась компания Nippon Steel Corporation. Со второй половины 90-х гг. продажи титана и его сплавов в японский автомобильный сектор значительно увеличились, а за 2006 г. объем поставок национальным и зарубежным автомобилестроителям составил 1600 тонн. Компания начала продвижение титана и его сплавов в автомобильной отрасли в начале 90-х годов с производства подвесных рессор и клапанов для двигателей двухколесной техники, постепенно переходя на различные детали автомобилей.

Одним из первых японских серийных автомобилей, оснащенных титановыми деталями (клапанами цилиндров), был Toyota Altezza. Для впускных клапанов был использован сплав Ti-6Al-4V, для выпускных – IMI834. В результате этого вес клапанов снизился на 40% по сравнению со стальными, максимальная частота оборотов увеличилась на 700 об/мин, а шум уменьшился на 30% [16].

В 2009 году на Токийском автосалоне был представлен один из самых легких спортивных автомобилей Lexus LFA. Кузов Lexus LFA сделан из алюминия, титана и углеродного волокна, в двигателе дорожной версии LFA используются титановые клапаны и шатуны, в результате чего достигнуто снижение массы автомобиля до 1485 кг [21].

За прошедшие 10-15 лет Nippon Steel Corporation запатентовала около 120 своих разработок, связанных с применением титана и титановых сплавов в автомобильной промышленности. К ним относится и разработка новых титановых сплавов, например, таких как сплавы Super - TIX[®]10CU (Ti-1%Cu) и Super - TIX[®]10CUNB (Ti-1%Cu-0,5%Nb) [17, 20]. Листы из этих сплавов имеют довольно высокие прочностные характеристики, сопротивление усталости, коррозионную стойкость, при этом обладают хорошей технологической пластичностью. Сплавы предназначены для изготовления выхлопных систем автомобилей NISSAN GT-R EGOIST, AUDI TTS, Porsche 997 GT3 [7, 17].

Американская компания Titanium Metals Corp. (Timet) создала специальное подразделение Timet Automotive для обслуживания автомобильной промышленности и обеспечения ее растущих потребностей в титановых полуфабрикатах и деталях [9]. Помимо производства стандартных сплавов, Timet разрабатывает новые титановые сплавы, созданные специально для автомобильного рынка. Для изготовления

деталей выхлопных систем был разработан сплав TIMETAL Exhaust XT (Ti-0,5Fe-0,6Si-0,15O) [16]. Глушители и выхлопные трубы из этого сплава весят в два раза меньше, чем аналогичные детали из стали, и имеют срок службы 12-15 лет.

Идеальным вариантом для автомобильных пружин считают сплавы TIMETAL LCB (Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al) и Ti-38-644 (Beta C; Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr) [5]. Для сплава Ti-38-644, имеющего оптимальное сочетание плотности и модуля упругости, разработана специальная технология (прокатка + холодное волочение + старение), которая обеспечивает хорошие свойства на кручение. В 2002 году американская автомобильная промышленность использовала 1100 тонн титана (в 1995 году - 100 тонн) для изготовления клапанов двигателей, шатунов, выхлопных систем, шпилек для установки ободьев колес, подвесных рессор [9].

По данным китайских исследователей и представителей компании Goldsun Metal объем титановых полуфабрикатов в 1990 г. составил 50 т, в 1997 г. - 500 т, 2002 г. – 1100 т, 2009 г. – 3000 т, что существенно опережает темпы роста производства Японии и США [18].

Основным препятствием к внедрению титана и его сплавов в автомобилестроении является их высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами. Это связано с трудностями извлечения титана из руд, его плавки и переработки слитков в полуфабрикаты и изделия, а также с высокой стоимостью титановой губки. Не последнюю роль здесь играет и плохая обрабатываемость резанием высокопрочных титановых сплавов, особенно сплавов на основе алюминидов титана.

Эти затруднения могут быть преодолены благодаря разработке более дешевых сплавов, более широкому использованию отходов титана в производстве, совершенствованию технологии обработки и производства. В частности, при выплавке слитков для деталей спортивного автомобиля Chevrolet Corvette Z06 американская компания Titanium Metals Corp (Timet) применяет электронно-лучевую плавку, что позволяет использовать все побочные продукты и отходы аэрокосмической отрасли и снизить стоимость конечного продукта [19]. В Японии разработан новый $\alpha+\beta$ -сплав KS Ti-4,5Al-4Cr-0,5Fe-0,2C с экстремально низким напряжением течения при горячей обработке давлением, который при этом имеет хорошую обрабатываемость резанием, что позволило существенно снизить стоимость деталей автомобиля. В Китае интенсивно разрабатывают дешевые титановые сплавы для автомобилестроения [5, 6]. Для повышения эффективности механической обработки титановых сплавов и в нашей стране, и за рубежом разработано достаточно большое число способов, обзор которых рассмотрен в работах [11,12].

В будущем области применения титана и его сплавов в автомобилестроении, несомненно, будут расширяться, так как реализованы

далеко не все возможности использования их привлекательных и часто уникальных свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 с.
2. Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. - М.: ВИЛС, 2000. – 316 с.
3. Елагин В.И., Колачев Б.А., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. 4-е издание. - М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
4. Различные виды классификации отечественных титановых сплавов / Егорова Ю.Б. [и др.] // Титан. - 2012. - №2 (36). - С.11-18.
5. Titanium' 2003. Sci. and Technol. Proc. 10th World Conf. on Titanium. - Hamburg, Germany, 13-18 July 2003. - Vol. 1-5. - 3425 pp.
6. Titanium' 2007. Sci. and Technol. Proc. 11th World Conf. on Titanium. - Kyoto, Japan: Japan Institute of Metals, 3-7 June 2007. - Vol. 1-2. -1765 pp.
7. Titanium' 2011. Sci. and Technol. Proc. 12th World Conf. on Titanium. - Beijing, China, 19-25 June 2011. - Vol. 1-3.
8. Фишер Д., Зибум Х. Применение перспективных титановых сплавов в автомобилестроении// Титан – 1993. - № 1. - С. 82-85.
9. Targeting titanium-using automarkers [Электронный ресурс] // American Machinist. 2002. Vol. 146. N.1. P. 22, 24. URL: <http://americanmachinist.com/casebooks/targeting-titanium-using-automakers>. (дата обращения: 22.03.13)
10. Титан в машиностроении [Электронный ресурс] URL: <http://npotitan.ru/spravka/primenenie-tittana/mashinostroenie/> (дата обращения: 21.03.2013)
11. Титан и титановые сплавы в автомобилестроении / Егорова Ю.Б. [и др.] // Автомобильная промышленность. - 2010. - № 10. - С. 41-43
12. Промышленное освоение технологии изготовления цельнокатаных титановых заготовок для сборного автомобильного колеса. / Зиновьев В.Н. [и др.] // Титан. - 1998. - № 1 (10) - С. 68-70.
13. Борбашов В.М., Дрогалин К.О., Москвичев Ю.П., Панин В.И. Клапан двигателя внутреннего сгорания, способ его изготовления и жаропрочный титановый сплав для него. Патент RU 2244135 С2, 2003.
14. Ночовная Н.А., Исаичев А.В., Анташев В.Г. Проблемы создания экономичных титановых сплавов и пути их решения // Все материалы. Энциклопед.справочник. – 2008. - № 5 - С.10-15.
15. Полькин И.С., Гребенюк О.Н., Саленков В.С. Интерметаллиды на основе титана // Технология легких сплавов. – 2010. - № 2 – С. 5-15.

16. Froes F.H., Yu K. Emerging application for titanium. //Titanium' 2003. Sci. and Technol. Proc. 10th World Conf. on Titanium. - Hamburg, Germany, 13-18 July 2003. - Vol. 5. - P. 2999-3010.
17. Рошке И. Nippon Steel лидирует по продажам титана в автомобилестроении [Электронный ресурс] URL: <http://www.sogra.ru> (дата обращения: 21.03.2013)
18. Titanium and titanium alloy in automotive applications [Электронный ресурс] URL: <http://www.goldsunmetal.com/show.asp?id=265> (дата обращения: 27.03.2013)
19. Kurt A. Kuster. New production technology makes titanium attractive to automakers [Электронный ресурс] // <http://americanmachinist.com/shop-operations/titanium-takes-road> (дата обращения: 21.03.2013)
20. Otsuca H. Development of new titanium alloy sheets for automobile exhaust systems with excellent formability and heat resistance // Titanium Japan. – 2012. - Vol.60. - N. 2. - P.126-131.
21. Tamura C., Kuroda M., Scirabe T. The use of titanium materials for Lexus LFA // Titanium Japan. – 2010. - Vol.58. - N. 3. - P.201-203.
22. Способы повышения эффективности механической обработки титана и его сплавов/ Егорова Ю.Б. [и др.] // Материаловедение. - 2012. - № 7. - С.8-12.
23. Methods of increasing efficiency of machinability of titanium and titanium alloys/ Egorova J.B. [and oth.] //Inorganic Materials: Applied Research. - 2013. - Vol. 4 - N. 1. - P. 46-51.