

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

А. И. Рудской А. А. Попович А. В. Григорьев

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Учебное пособие



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2018

ББК 34.437я73

Р83

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор кафедры

ТИМ ИММиТ СПбПУ *Е. Л. Гюлиханданов*

Кандидат технических наук, ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт» *Б. В. Фармаковский*

Рудской А. И. **Перспективные материалы в авиадвигателестроении** : учеб. пособие / А. И. Рудской, А. А. Попович, А. В. Григорьев. — СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. — 239 с.

Рассмотрены особенности перспективных материалов и покрытий, определяющих научно-технический прогресс в авиационном двигателестроении. Приведена классификация и указаны области применения материалов и покрытий.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим специальностям, также может быть использовано для повышения квалификации инженерных кадров.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISBN 978-5-7422-6303-6
doi:10.18720/SPBPU/2id18-112

© Рудской А. И., Попович А. А.,
Григорьев А. В., 2018

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
<i>Глава 1.</i> СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА	13
<i>Глава 2</i> НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ	19
2.1. Литейные сплавы	25
2.2. Деформируемые никелевые сплавы	52
2.3. Специальные никелевые сплавы	64
<i>Глава 3</i> СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА	70
<i>Глава 4</i> ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ СПЛАВЫ	89
4.1. Интерметаллидные титановые сплавы	90
4.2. Интерметаллидные сплавы на основе никеля	101
<i>Глава 5</i> КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	111
5.1. Композиционные материалы на основе титана	114
5.2. Композиционные материалы на основе ниобия	120
5.3. Керамические композиционные материалы	134
5.4. Металлополимерные слоистые композиты	138
<i>Глава 6</i> СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ	141
6.1. Технологии получения покрытий	143
6.2. Защитные алюминидные покрытия	151
6.3. Жаростойкие ионно-плазменные покрытия	153
6.4. Теплозащитные покрытия	156
6.5. Комплексные градиентные покрытия	164
6.6. Высокоресурсные эмалевые покрытия	167
6.7. Специальные покрытия титановых сплавов	170
6.8. Специальные покрытия ниобиевых сплавов	175
6.9. Покрытия для предотвращения фреттинга	178
<i>Глава 7</i> ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ	181
7.1. Технологии производства интерметаллидных сплавов	181
7.2. Технологии получения естественных композитов на базе системы Nb–Si	189
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	207
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	208
ГЛОССАРИЙ	229
<i>Приложение</i> БАЗА ДАННЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ (РАЗРАБОТЧИК И ИЗГОТОВИТЕЛЬ — ФГУП «ВИАМ»)	232

Введение

В конструкции современных самолетов применяются различные материалы: легкие сплавы (алюминиевые и магниевые), титан и его сплавы, стали и их сплавы, древесина (натуральная и облагороженная), ткани, резина, пластмассы и др. Каждый материал обладает химическими и физико-механическими свойствами, которые и определяют его технологические свойства и области применения.

Материалы, используемые в конструкции самолета, должны обладать следующими свойствами:

- высокими физико-механическими характеристиками при минимальном весе в условиях как обычных температур, так и аэродинамического нагрева конструкции;

- высокими технологическими свойствами для обработки применяющимися на самолетостроительных заводах технологическими процессами (резание, давление, сварка и пр.);

- возможно более простой защитой поверхностей материала от коррозии.

Для конструкций самолетов, подвергающихся в полете аэродинамическому нагреву, выбор материалов необходимо производить с учетом влияния высоких температур на их характеристики (рис. 1). Прочность и, следовательно, удельная прочность материала существенно изменяются с изменением температуры. При выборе материала также следует учитывать его стоимость и дефицитность.

Ключевой фактор снижения эксплуатационных расходов в течение всего срока службы (увеличивается полезная нагрузка, уменьшается расход топлива) — уменьшение веса самолета, поэтому стали появляться в качестве заменителей металлических сплавов в элементах конструкции и трубопроводах, не подвергающихся воздействию высоких температур, современные композиционные материалы.

Экономичность на современном этапе развития авиации часто имеет решающее значение. С учетом неотвратимо надвигающегося истощения природных запасов энергоносителей земли (угля, нефти, газа) затраты на производство материалов оказывают значительное влияние на стоимость каждой единицы авиатехники.

Как правило, металлы в чистом виде в авиатехнике применяют очень редко. На основе каждого металла создают большое число сплавов, обладающих широким спектром свойств. В авиастроении часто применяют алюминиевые

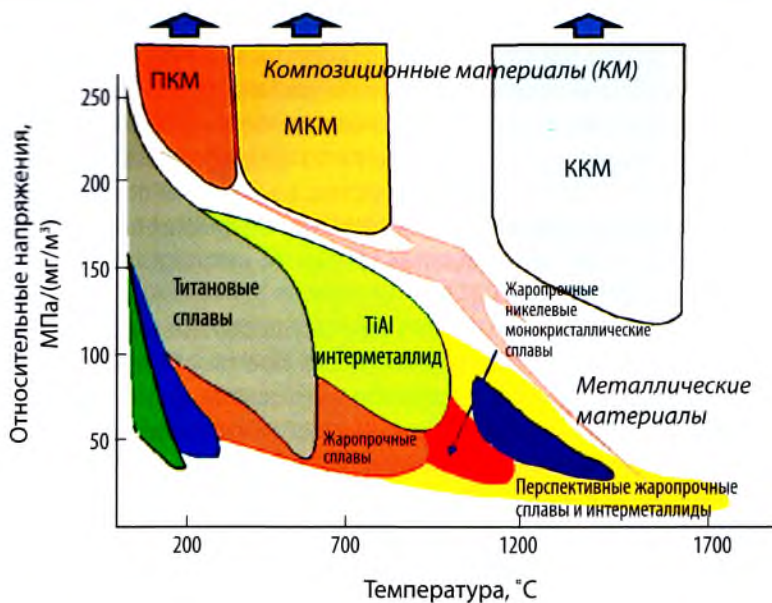


Рис. 1. Материалы, применяемые в самолетостроении [358]

сплавы, а также сплавы магния, титана и меди, бериллиевые сплавы, сплавы никеля и некоторые тугоплавкие сплавы, в электронных схемах, электротехнических устройствах для изготовления электропроводов — благородные металлы, сплавы алюминия, никеля, меди, кобальта и др.

Цветные металлы, на основе которых создают сплавы, разделяют на легкие (например, Al, Mg) и тяжелые (например, Cu, Pb), тугоплавкие (W, Mo и др.), благородные (например, Au, Pt), сплавы — на группы по функциональному назначению, например антифрикционные, жаропрочные и жаростойкие сплавы, конструкционные и коррозионностойкие сплавы.

Антифрикционными называют сплавы, обеспечивающие в подвижных соединениях низкий коэффициент трения, что повышает срок службы изделия. Кроме того, антифрикционные сплавы обладают высокой износостойкостью.

Жаропрочные сплавы относятся к материалам, способным сопротивляться деформированию и разрушению под воздействием механических нагрузок при высокой температуре. Кроме того, жаропрочные сплавы обладают высоким сопротивлением ползучести.

Жаростойкими называют сплавы, способные сопротивляться воздействию газовой среды при высоких температурах.

Конструкционные сплавы служат для изготовления самых разнообразных деталей самолетов, вертолетов и авиадвигателей. В авиатехнике могут использоваться только те материалы, которые сочетают в себе качества, обеспечивающие выносливость, прочность, надежность и долговечность при низкой плотности и малых затратах на изготовление.

Коррозионностойкие сплавы способны сопротивляться коррозионному воздействию окружающей среды и не подвергаться внезапному разрушению из-за высокой скорости коррозионных повреждений.

В авиационном двигателестроении на первое место выходят проблемы снижения затрат на производство и эксплуатацию двигателей при уменьшении их веса и повышении рабочих характеристик на базе уже созданных материалов при экстремально возможном увеличении эффективности использования этих материалов для изготовления наиболее нагруженных компонентов газотурбинных двигателей (ГТД).

Авиационные двигатели состоят преимущественно из металлических компонентов (рис. 2). Там, где важнее всего прочность и легкость (детали конструкции, части компрессора, каркасы двигателей), используют различные алюминиевые и титановые сплавы. Там, где требуется высокая термостойкость и устойчивость к коррозии (секции камеры сгорания и турбины), используются сплавы хрома, никеля и кобальта, в промежуточных местах — множество разных марок стали.

К авиационным двигателям относятся все типы тепловых машин, используемых как движители для летательных аппаратов авиационного типа. Авиационные двигатели делятся на три класса: поршневые (ПД), воздушно-реактивные (ВРД включая ГТД), ракетные (РД, или РкД).

Повышение требований к эксплуатационным характеристикам, экономичности и надежности газотурбинных двигателей, что обусловлено необходимостью существенного увеличения ресурса, иногда создает неразрешимые сложности при выборе материалов и разработке технологических процессов

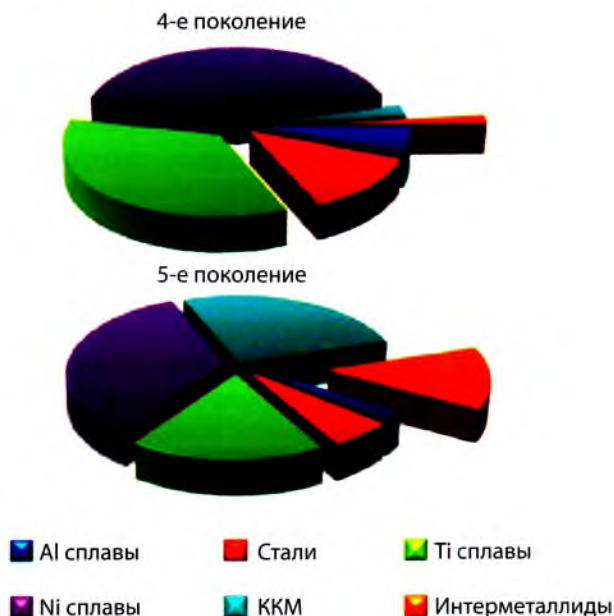


Рис. 2. Применение материалов в ГТД [358]

изготовления из этих материалов наиболее нагруженных деталей вентилятора, компрессора и турбины ГТД, прежде всего лопаток и дисков. Решить данную проблему можно только с использованием комплексного подхода, включающего в себя разработку новых материалов, улучшение уже применяемых сплавов, развитие методов изготовления заготовок и способов модифицирования поверхности деталей.

В настоящее время для авиации особую актуальность приобрели новые композитные материалы. Ту-204 стал первой моделью, изготовленной в основном из композитных материалов. Использование композитов значительно облегчает конструкцию и увеличивает ресурс узлов и агрегатов. В авиалайнере Ту-214 около 25 % всей конструкции выполнено из композитных материалов, а в Boeing-787 Dreamliner — 50 %. Новые самолеты «Сухой Superjet» и МС-21 содержат значительно больше по сравнению с Ту-214 композитных материалов, на них планируется установить так называемое черное крыло, все элементы конструкции которого будут сделаны из углеродного композита.

Помимо композитных материалов в авиационной промышленности используются покрытия из нанокерамики, которые находят применение более чем в 150 областях производства: это и валы пропеллеров, и телескопические перископы, и т. д. Нанокерамика используется везде, где необходимы водонепроницаемость и защита от коррозии. Новый материал намного жестче обычной керамики и не столь ломок.

С помощью наноструктур ученым удалось втрое повысить жесткость материалов, созданных на основе карбида кремния. Уже появилось покрытие для прозрачных полимерных поверхностей, состоящее из наночастиц в растворе и в несколько раз увеличивающее прочность пластика. На пластиковой поверхности они образуют сверхтвердую пленку, которая защищает не только от биологических и химических агентов, но и от пули.

Многолетняя отечественная и зарубежная практика показала, что более 80 % инновационных разработок в ведущих отраслях промышленности и секторах экономики базируется на внедрении новых материалов и технологий их производства.

Реализация задач развития двигателестроения в России возможна только при использовании новых жаропрочных и жаростойких сплавов на основе никеля, титана и ниобия, интерметаллических соединений, жаростойких и высокоградиентных теплозащитных покрытий лопаток, конструкционных композиционных материалов с рабочими температурами до 2200 К без охлаждения и покрытий в условиях вибро- и термоциклического нагружения в течение межремонтного ресурса — не менее 4000 ч.

Для увеличения эффективности ГТД — повышения температуры газа перед турбиной, снижения массы двигателя (отношение тяги к весу 20 : 1) и оптимизации — необходимо повышать эксплуатационные характеристики материалов. Созданные во ФГУП «ВИАМ» высокожаропрочные рений- и ренийрутенийсодержащие сплавы (ВЖМ4, ВЖМ5-У, ВЖМ6) с монокристаллической структурой для рабочих лопаток турбовинтового двигателя (ТВД)

перспективных ГТД, отвечают по своим характеристикам мировому уровню. В перспективе до 2020–2025 гг. намечен переход от никелевых сплавов к сплавам системы ниобий–кремний, что позволит повысить рабочую температуру еще на 150–200 °С.

Для дальнейшего повышения рабочих температур деталей ГТД в последнее десятилетие разработаны сплавы на основе соединений никель–алюминий. Следующий этап развития связан с производством наноструктурированных интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой (ВКНА-1В, ВКНА-25, ВИН2, ВИН3), которые будут использоваться для рабочих и сопловых лопаток ГТД 5-го и 6-го поколений. Таким образом, за последние 40 лет температурный уровень работоспособности литейных жаропрочных сплавов вырос на 400 °С, т. е. в среднем на 6,7 °С в год.

Разработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков перспективных ГТД обеспечила повышение рабочей температуры дисков на 100–150 °С и ресурса турбины в 1,5–2,0 раза. Созданные сплавы, в частности сплав ВЖ175-ИД, не уступают по эксплуатационным характеристикам лучшим зарубежным образцам, а по длительной прочности превосходят их. Для статорных деталей горячего тракта перспективных ГТД (камера сгорания, корпус и др.) разработаны высокожаропрочные технологичные свариваемые сплавы ВЖ155-ИД, ВЖ171-ВИ, ВЖ172-ИД и ВЖ172-ИШ, обеспечивающие увеличение рабочих температур на 150–200 °С и повышение ресурса узлов двигателя в два-три раза. При этом сплавы ВЖ155-ИД и ВЖ171-ВИ, предназначенные для жаровых труб, в отличие от остальных никелевых сплавов, упрочняются за счет нитридов титана, которые образуются при высокотемпературной обработке в атмосфере азота готовых деталей.

Применение новых классов материалов и технологий должно обеспечить:

- увеличение рабочей температуры газа двигателей нового поколения с 1300–1400 до 1600–1800 °С;
- снижение расхода топлива с 0,6 до 0,4 кг топлива/кг тяги в час;
- повышение тяги с 28 000 до 40 000 кгс;
- повышение надежности и ресурса дисков в два-три раза, температуры на 50–70 °С, снижение веса дисков на 10–15 %;
- снижение расхода дефицитных легирующих элементов (Co, W, Nb, Re и др.).

Основными факторами, определяющими технический прогресс в области создания перспективных ГТД авиационного и наземного назначения, являются разработка новых жаропрочных сплавов для рабочих и сопловых лопаток, процессов и оборудования для производства монокристаллического литья, решение проблем эффективного охлаждения деталей, а также обеспечение выхода годной продукции по геометрическим и кристаллографическим параметрам и структурного совершенства получаемых отливок.

Рассмотрим *требования к материалам и деталям ГТД* более подробно.

Прогресс в создании и совершенствовании газотурбинных двигателей в значительной степени определяется достижениями в области разработки

эффективных материалов для деталей и узлов. Новым поколениям авиационных газотурбинных двигателей необходимы материалы с рабочей температурой до 2000 °С, прочностью до 250 МПа, коэффициентом температурного расширения, близким к нулю, и ресурсом работы в сильно окислительной атмосфере до 1000 ч и более.

Основные материалы, используемые в настоящее время при изготовлении ГТД, — высокопрочные стали, титановые сплавы, а также сплавы на никелевой основе. Остальные материалы применяются реже. В последние годы наметилась тенденция использования новых перспективных материалов. Среди материалов будущего, способных дать ускоряющий импульс развитию новой техники и технологиям, особенно при создании конструкций авиационных и ракетно-космических систем XXI в., выделяют интерметаллидные сплавы и композиционные материалы с керамической матрицей (керамокомпозиты). Их использование для деталей и узлов двигательных установок обеспечит снижение веса конструкций до 40 %. Материалы из интерметаллидов и керамокомпозитов в программах создания многофазовых систем будут применяться в качестве основного конструкционного материала, составляющего более 50 % веса конструкции. Одним из сдерживающих факторов быстрого распространения новых материалов является относительно высокая цена, для ее снижения необходимо совершенствовать существующие и разрабатывать новые экономичные, экологически чистые, ресурсосберегающие технологии производства.

Основные требования к материалам, используемым при изготовлении деталей ГТД, — высокая удельная прочность, жаропрочность и жаростойкость, сопротивление коррозии, стабильность и воспроизводимость механических свойств, хорошая обрабатываемость современными методами заготовительного производства, размерной обработки, сварки и т. д. Каждый вновь разработанный материал должен пройти через систему исследований и испытаний в условиях, приближенных к эксплуатационным, и на реальных изделиях.

Выбор группы материалов и конкретного материала производится исходя из требований, предъявляемых к деталям и узлам изделия (табл. 1).

Применяемые и перспективные для использования в основном производстве двигателей авиационной техники материалы могут быть разделены на основные группы:

- 1) металлы и сплавы: стали, титановые сплавы, никелевые сплавы, сплавы на алюминиевой и медной основе и др.;
- 2) конструкционные керамики и металлокерамики, керамические композиционные материалы;
- 3) интерметаллидные сплавы типа Ti—Al;
- 4) композиционные материалы с полимерной и металлической матрицей, функционально-градиентные материалы;
- 5) углерод-углеродные композиционные материалы;
- 6) полимерные материалы.

Таблица 1 Выбор материалов для деталей ГТД [160]

Узел и требования к нему	Материалы, используемые для изготовления
<i>Вентилятор (винт)</i>	
Вентилятор: диапазон рабочих температур — примерно $-40 \dots +40$ °С, высокая прочность, малый вес, безопасность при разрушении вентилятора, сопротивление воздействию ударов (столкновения с птицами и проч.)	Полимерные композиционные материалы или титановые сплавы. Предпочтительна слоистая структура материала
Детали узла вентилятора: диапазон рабочих температур 200–300 °С, высокие аэродинамические качества (всасывающее действие), компактность	Сплавы на никелевой основе, титановые сплавы, полимерные композиционные материалы
<i>Компрессор</i>	
Лопатки: диапазон рабочих температур 400–650 °С, усталостная прочность, сопротивление эрозии	Титановые сплавы, стали, сплавы на никелевой основе
Диски: диапазон рабочих температур 400–650 °С, высокая прочность, сопротивление центробежным нагрузкам, сопротивление усталости	Титановые сплавы, сплавы на никелевой основе
<i>Камера сгорания</i>	
Рабочая температура — около 1550 °С, сопротивление термическим ударам, сопротивление окислению и газовой коррозии	В настоящее время сплавы на никелевой основе с жаростойкими покрытиями, иногда с термобарьерными покрытиями и облицовкой керамикой. В перспективе керамокомпозиты
<i>Турбина</i>	
Диапазон рабочих температур 950–2000 °С, прочность при центробежных и осевых нагрузках, жаропрочность, сопротивление ползучести, жаростойкость, сопротивление термическим ударам	Диски — сплавы на никелевой основе. Лопатки — сплавы на никелевой основе с монокристаллической структурой и жаростойкими и термобарьерными покрытиями, интерметаллиды, керамика
<i>Валы</i>	
Диапазон рабочих температур 50–850 °С, высокая прочность и жаропрочность	Высокопрочные стали и сплавы на никелевой и железоникелевой основе
<i>Сопло</i>	
Диапазон рабочих температур 650–1300 °С, жаростойкость, сопротивление эрозионному воздействию газового потока	Сплавы на никелевой основе с жаростойкими и термобарьерными покрытиями, титановые сплавы, керамокомпозиты

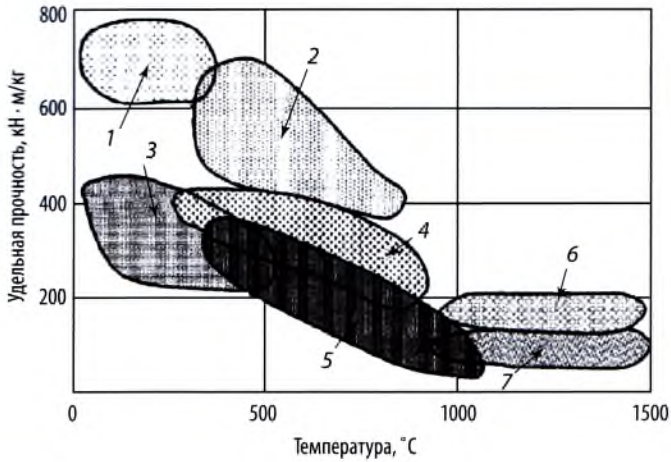


Рис. 3. Удельная прочность материалов и температурные области их целесообразного использования: 1 — полимерные композиционные материалы; 2 — композиционные материалы на металлической основе типа Ti-SiC; 3 — титановые сплавы; 4 — интерметаллидные сплавы типа Ti-Al; 5 — сплавы на никелевой основе; 6 — углерод-углеродные композиционные материалы; 7 — керамические композиционные материалы [160, 226]

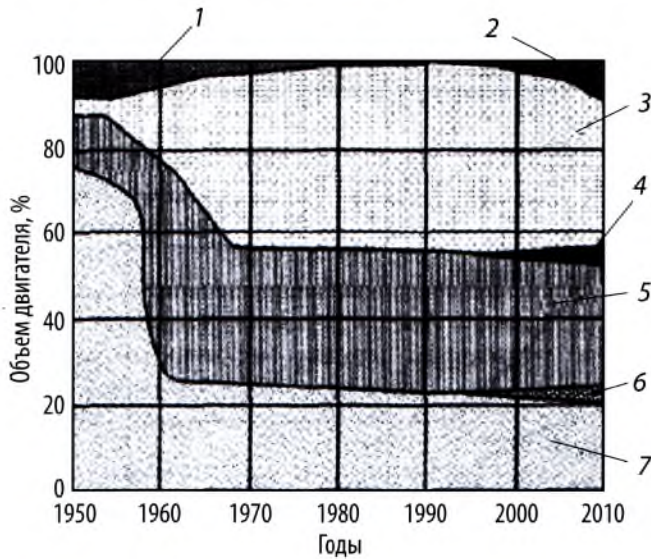


Рис. 4. Характер изменения применимости материалов по мере развития производства ГД: 1 — алюминиевые сплавы; 2 — полимерные композиционные материалы; 3 — титановые сплавы; 4 — металлические композиционные материалы; 5 — никелевые сплавы; 6 — керамические композиционные материалы; 7 — высокопрочные стали [160]



Рис. 5. Перспективные материалы для двигателей 5–6-го поколения [218]

Таблица 2 Максимальные температурные пределы использования материалов для ГТД [160]

Группа материалов	Максимальная температура, °С
Полимерные композиционные материалы	230–260
Титановые интерметаллидные сплавы	650–1040
Никелевые сплавы	650–850
Монокристаллические никелевые сплавы	870–1095
Никелевые сплавы для камер сгорания (листовые)	870–1095
Углерод-углеродные композиты	950–1200
Керамокомпозиты	1200–1500

Значения удельной прочности и температурные области применения некоторых материалов представлены на рис. 3–5, максимальные температурные пределы их использования — в табл. 2.