

ВВЕДЕНИЕ

Механика деформируемого твердого тела — обширная область знаний о свойствах и поведении твердых тел под действием физических полей различной интенсивности и различного характера. Практическое воплощение этих знаний мы ощущаем в вещах и предметах повседневного быта, изделия и конструкции, построенные по принципам и законам механики деформируемого твердого тела, используются и применяются человеком с глубоких доисторических времен по настоящее время. Постоянное совершенствование и углубление знаний о физическом строении твердых тел, законах и закономерностях сопротивления тел действию статических и динамических нагрузок обеспечивает непрерывное повышение качества жизни человека, рост эффективности человеческой деятельности.

Данное учебное пособие посвящено отдельному разделу механики деформируемого твердого тела — методам экспериментального наблюдения поведения твердого тела на заключительных стадиях его сопротивления статическому и циклическому нагружению: деформирования и разрушения. В названии пособия отражен основной прикладной смысл необходимости такого рода исследований, так как фактически возможные разрушения твердых тел, в частности, стальных изделий, могут предотвращаться в результате точного и достоверного наблюдения за деформациями тел в наиболее нагруженных областях конструкции.

Опасность применения конструкционных материалов в строительстве различных сооружений и технических систем для удовлетворения всех возрастающих потребностей человека обусловила постоянное стремление разработки теорий и методов прогнозирования свойств сопротивления материалов действию нагрузок, определения надежности и прочности конструкций. В данном учебном пособии, в совершенно кратком объеме, приведены примеры отдельных нормативных требований, предъявляемых к стальным изделиям и конструкциям, которыми руководствуются инженеры, при работе над выполнением технических заданий на создание или модернизацию изделий и конструкций.

Кропотливый, многократно выверенный инженерный труд по проектированию и изготовлению стальных изделий, эксплуатируемых в различных природно-климатических условиях, при действии

разнообразных систематических или случайных эксплуатационных факторов, в ряде случаев, не обеспечивает расчетной гарантируемой длительности эксплуатации. Примеры ошибок конструирования и технологии изготовления, монтажа и эксплуатации изделий и конструкций приведены в учебном пособии для того, чтобы обратить внимание читателя на особую ответственность выбранного им направления деятельности.

Последующие разделы учебного пособия посвящены экспериментальному изучению сопротивления распространенных конструкционных сталей действию статических нагрузок на заключительных стадиях деформирования и разрушения. Теоретическую основу предпосылкам создания и активного использования новых экспериментальных методов, описанных в пособии, составили классические труды по линейной и нелинейной механике разрушения, физике процессов деформирования и разрушения конструкционных сталей и других конструкционных материалов.

Необходимо отметить, что изучение сопротивления твердых тел действию нагрузок при различных эксплуатационных режимах и условиях, требует постоянного совершенствования инструментальных средств, обеспечивающих максимальную полноту прямой информации о процессах деформирования и разрушения. Внедрение новых информационных технологий в практику лабораторных, натурных и эксплуатационных испытаний дает основания на раскрытие неизвестных до настоящего времени скрытых потенциальных возможностей снижения коэффициентов запаса прочности конструкционных сталей, с целью научно обоснованного подхода к вопросам уменьшения материоемкости стальных изделий и конструкций.

Активное применение методов неразрушающего контроля несущей способности изделий и конструкций — важнейшее направление практического приложения достижений линейной и нелинейной механики разрушения. Именно поэтому в данном учебном пособии заключительный раздел составлен из материалов компилятивного характера, с целью привлечь интерес читателя к нерешенным вопросам непрерывного диагностирования изменения несущей способности сложных технических систем с помощью инструментов и средств неразрушающего контроля.

Интенсификация внедрения в образовательный процесс систем автоматизированного проектирования (APM Win Machine, КОМПАС, NanoCAD, Solid Works, ANSYS и других) обеспечивает качественное

мотивированное изучение основ механики, причины и следствия действия всех видов нагрузок на твердые тела, графически представленные в реальных масштабах пространства и времени. Глубокое осмысление процессов нагружения изделий и конструкций при компьютерном моделировании, возможностей оптимизации конструктивных решений всемерно способствуют раскрытию и закреплению творческих способностей личности человека.

Современные эффективные и надежные программные системы расчета энергетических и кинематических параметров, прочности, жесткости и устойчивости, выносливости и других эксплуатационных свойств позволяют моделировать широкий спектр поведения стальных изделий и конструкций, раскрывают новые возможности использования конструкционных сталей в машиностроении.

1. СТАЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ И КОНСТРУКЦИИ

1.1. Изделия и их значение в развитии человека

Исторической наукой установлено, что первые изделия человека из костей животных и природных камней предназначались для изготовления охотничьего и боевого инвентаря, обработки шкур, дерева, камней, земли и т. п. По мере появления и расширения знаний о свойствах природных веществ окружающего мира человек начинает использовать при изготовлении изделий новые более прочные материалы. Опытным путем, путем наблюдения за свойствами различных природных материалов человек выделил группу металлов, которые стали применяться наряду с деревом и камнем в качестве конструкционных материалов, прежде всего — золото, серебро, медь, олово. Применение именно этих материалов было связано с тем, что они встречаются в природе в виде самородков, размеры которых позволяли использовать их для своих целей при минимальной обработке более 6000 лет тому назад.

В исторической науке до недавнего времени доминировало представление, что практическая необходимость все расширяющегося применения изделий из металлов было обусловлено, в большей степени, потребностями изготовления хозяйственного инструмента, охотничьего, рыболовного инвентаря и боевого оружия. Новые данные, количественный анализ древнейших металлических изделий указывают, что наряду с изделиями — орудиями труда и вооружения, значительная часть изделий использовалась в виде украшений и знаков социального положения и/или престижа. Многие исследователи ранних периодов применения металлов для изготовления изделий различного назначения склонны утверждать, что стремление к демонстрации богатства, могущества, власти обладателями металлических изделий определило процессы культурного, производственного и социального развития древних обществ (рис. 1).

Плавка и кузнечная обработка самородной меди — начальные этапы технологического освоения металла — проложили путь к технологии выплавки необходимого металла из природных руд, т. е. определили развитие металлургии, способствовали развитию технологий изготовления орудий, новых инструментов, развитию новых и совершенствованию старых ремесел. Среди них на первом месте стоит плотницкое ремесло и кораблестроение. Металлические боевые сред-

ства оказали значительное «давление» на древние общества, стимулируя поиски рудных ресурсов и расширение производства металла.

Отечественные исследователи связывают зарождение первых мировых цивилизаций с районами крупных производственных, историко-культурных систем, связанных между собой металлургическими, металлообрабатывающими центрами. Историко-металлургические исследования далекого прошлого позволили выявить тесные взаимосвязи уровня социального и культурного развития с интенсивным обменом знаний и технологических навыков в области таких передовых отраслей производства, как горное дело и металлургия.

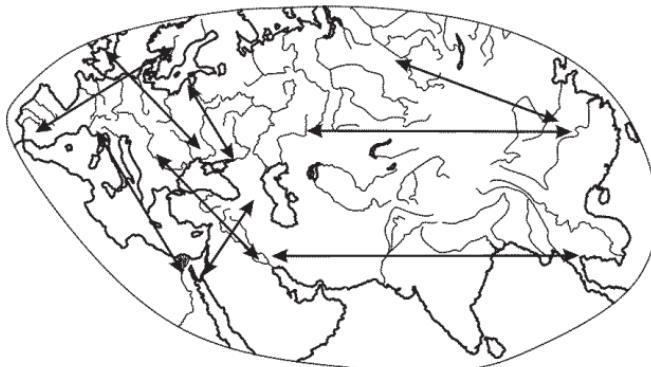


Рис. 1

Карта обмена изделиями на территории Евразии

Важная роль металлических изделий в развитии культурных и социальных процессов древности характеризуется тем, что металлы были одним из основных видов сырья, добывавшихся для внутреннего потребления и товарообмена. Добыча металлов, изготовление металлических изделий не только требовали развития ранней металлургии и металлообработки, распространения технологических и иных достижений, но и формировали в обществе готовность к принятию технических и культурных инноваций.

Значительная роль металлов, металлических изделий в первобытных обществах вызывала стремление к расширению обмена роскошными и престижными вещами, новыми технологическими навыками, стимулировало интенсификацию производства и рост излишков продукции. Население отдельных регионов, успешно осваивающее производство металла и металлических изделий, получало перспективы роста численности и изменения структуры первобытного обще-

ства путем перехода к ранним формам государственных структур. В таких структурах выделяются отдельные социально привилегированные группы и начинают развиваться специализированное ремесленничество.

Технологический уровень производства, обусловленный земледелием, животноводством, ранней металлургией, создает условия для работы горняков, металлургов, литейщиков и кузнецов, ювелиров и других ремесленников. Крупнейшие производители продовольствия осуществляют обмен продовольственных продуктов, тканей, других изделий жителей долин на ценные необходимые материалы: дерево, строительные и поделочные камни, металлы, металлические изделия обитателей предгорий и горных плато, занимающихся скотоводством, добычей и переработкой минеральных ресурсов. Такие обмены различными изделиями послужили мощными катализаторами развития экономики и социальных отношений, образования древнейших государств.

Любое изделие производится, изготавливается по определенной технологии. Новое изделие, его новые конструктивные геометрические формы, размеры обусловлены разработкой и освоением новых технологических принципов обработки сырья, обеспечивающие или вызывающие создание в последующем нового образца изделия.

Эксперты, специалисты утверждают — новые изделия и конструкции могут появиться только тогда, когда изобретены (открыты) новые фундаментальные (базовые) промышленные технологии, которые создают основу для возникновения новых видов продукции. Примером тому является технология выплавки металла из руды, резко расширявшая возможности изготовления большого количества металлических изделий, отличающихся лучшим качеством и лучшими функциональными свойствами по сравнению с прежними изделиями. Группы людей, обладающих технологиями выплавки металла из руды, приобрели преимущество в наращивании богатства, власти и могущества.

Историческим опытом показано, что новым изделиям, конструкциям, новым технологическим процессам обязательно предшествует познание свойств материалов и веществ окружающего мира, законов и закономерностей природы и способов преобразования веществ и энергии. Вместе с тем, новые технические устройства, новые технологические процессы становятся базовыми, опорными платформами, на которых зарождаются, формируются новые требования к функциональным свойствам изделий, эксплуатируемых в обыден-

ной практике. Например, к изготовленному по новой технологии выплавки и ковки металлическому изделию, исходя из результатов его постоянного применения в практических условиях, возникают новые требования по прочности, размерам, форме, кинематическим и динамическим параметрам и т. п.

Современные изделия и конструкции

В государственных стандартах [ГОСТ 2.101-68], [ГОСТ Р 43.0.2-2006] под термином «изделие» понимается любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии (рис. 2). Исходя из современных условий, необходимо дополнить это определение — изделие не только должно быть изготовлено, но оно должно обладать свойствами и характеристиками, удовлетворяющими требованиям рынка, или должно обладать свойствами и характеристиками требованиям заказчика.

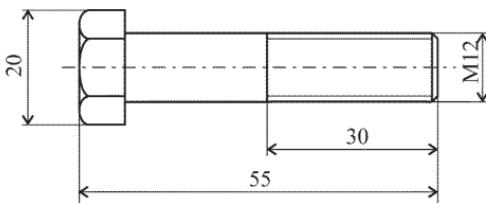


Рис. 2

Чертеж крепежного изделия — болт $M12 \times 1,25$, ГОСТ 7805

Под термином «конструкция» понимается взаимное расположение частей целого, устройство частей целого и устройство целого, единого объекта (рис. 3). В более широком смысле под термином «конструкция» в технике понимается строение целого, устройство какого-либо сооружения или его части. Термином «конструкция» характеризуют также взаимное расположение, соотношение частей речи в грамматических построениях. Термин «конструкция» активно используется при создании и анализе произведений искусства.

В данном разделе термины «изделие», «конструкция» применяются и используются для обозначения любых объектов, предназначенных для удовлетворения потребностей человека в материалах, инструментах, орудиях, механизмах, машинах, зданиях, сооружениях и других технических системах.

В обычном понимании изделием является множество различных полезных для человека вещей — предметы украшения, быта, хлебо-

булочные изделия, конфеты, швейные изделия и т. п. Любое изделие, изготавливаемое человеком, имеет свое предназначение. Изделие необходимо человеку как предмет украшения, как объект, улучшающий качество жизни и т. д. Изделия как предметы украшений достаточно четко делятся на типовые, массовые изделия и на отдельные единичные изделия, которые выходят за рамки «ремесленных» изделий и приобретают свойства произведения искусства.

Здесь же рассматриваются изделия, изготовленные из металлических материалов, преимущественно из стали различных марок. Изделия из металлических материалов, за редким исключением декоративных и подобных изделий, разрабатываются и изготавливаются для производства средств производства, для вооружения, для создания объектов инфраструктуры и различных технических устройств, обеспечивающих сохранение и развитие человеческого общества.

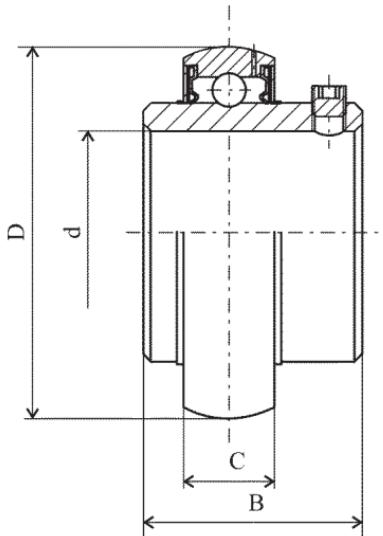


Рис. 3

Изделие — подшипниковый узел (указаны основные размеры, производство Italcuscinetti Group, Италия)

Практически все изделия, принятые и выпускаемые промышленностью, классифицируются в соответствии с государственными стандартами системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации. Эта государственная классификация необходима для обработки информации о продукции

во всех сферах народного хозяйства, в первую очередь для экономики, учёта, статистики и стандартизации. До 1 января 2017 года все изделия классифицировались и кодировались по классификатору ОК 005-93 «Общероссийский классификатор продукции», который был принят в 1993 году. В данном классификаторе приводился перечень кодов и наименований иерархически выстроенных классов, подклассов, групп, подгрупп и видов продукции, разделенных по наиболее значимым экономическим и техническим классификационным признакам. С 1 января 2017 года вводится в действие классификатор ОК 034-2014, в котором увеличено количество разделов и уменьшено количество группировок видов продукции.

Документ ОК 034-2014 «Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности» заменяет устаревшие классификаторы. Введение в действие этого документа обусловлено необходимостью гармонизации со Статистической классификацией продукции по видам деятельности в Европейском экономическом сообществе 2008 года (Statistical Classification of Products by Activity in the European Economic Community).

Известно, что любые сложные изделия состоят из множества деталей, например, современный легковой автомобиль, собран, в среднем, из 70...80 тысяч деталей. При этом каждая деталь выполняет свою определенную миссию, имеет научно обоснованную форму и размеры.

Детали собираются в функционально обозначенный сборочный узел (подузел), главными свойствами которого являются кинематические, динамические, эргономические, эстетические и другие не менее важные свойства, обеспечивающие надежную эксплуатацию узла (подузла) в составе единой машины, единого механизма или любого другого технического устройства.

1.2. Конструкционные свойства стали

Современные конструкционные материалы

По существу, великую ответственность инженера заключается в том, что он должен обладать способностью использования естественнонаучных знаний при разработке машин и механизмов из имеющихся материальных ресурсов, материалов, создавать новые перспективные материалы или при их эксплуатации.

Ещё на ранней стадии развития человечества познавательная деятельность человека и приобретаемый в течение трудового процес-

са опыт становились основными предпосылками построения двигателей рабочих машин и установления естественнонаучных правил и законов. Но вначале человек мог применять только природные материалы, поэтому для изготовления различных инструментов, жилищ, оружия и других устройств использовались дерево и камень, обладающие свойствами, минимально отвечающими требованиям твердости, прочности, износостойчивости и т. п. (рис. 4).

Проходит 2000 лет — и человек на основе опыта и приобретенных знаний приступает к извлечению металлов из природных горных руд, созданию сплавов — бронзы (сплав меди и олова), изготовления из них различных изделий. Целенаправленное накопление в течение более чем 1000 лет специальных знаний, опыта, технологий привело к активному использованию в качестве конструкционного материала железа, цинка и их сплавов — предшественников широко распространенных в настоящее время марок конструкционных сталей.

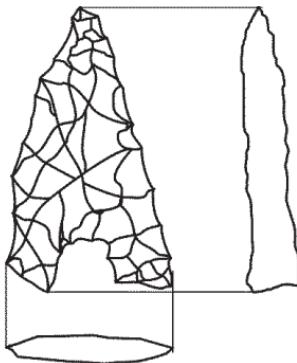


Рис. 4

Внешний вид каменного изделия — наконечника стрелы

Как известно, в химический состав современных металлических конструкционных сплавов, применяемых для изготовления машин, других конструкций, входят и другие химические элементы, например алюминий и магний, ванадий и хром, молибден и вольфрам, титан и бор, а также другие элементы. Важно отметить, что развитие технологий обработки материалов, получения и использования новых свойств материалов в последние годы протекают исключительно стремительно, для сравнения — применение алюминия и магния длится не более 100 лет, нержавеющей стали — 75 лет, наноматериалы — не более 15–17 лет.

Материалы на основе железа

Применение и совершенствование конструкционных материалов на основе железа, составляющих более 90% всех получаемых и промышленно используемых материалов, обусловили стремительное техническое развитие. Например, для изготовления первых паровых машин использовались листы пудлингового железа, полученные ковкой и на примитивных прокатных станах. Рабочие конструкции паровых машин (в частности, парогенераторы) собирались склеиванием отдельных листов. Низкие качество материалов и технологии изготовления конструкций приводили к авариям паровых машин в результате взрывов паровых котлов. Значительное повышение надежности эксплуатации паровых машин (парогенераторов) обусловила разработка технологий литья стали и мощных прокатных станов. Строительство железных дорог стало широко распространяться после разработки технологии проката сортового металла. Данная технология обеспечила производство большого количества рельсов и стальных балок с одинаковой точностью, тогда как ранее эти изделия изготавливались ковкой, а их размеры не могли быть выдержаны с требуемой точностью.

Тесная взаимообусловленность свойств конструкционных материалов и технических новшеств иллюстрируется следующим примером.

Острая потребность общества в тепловых двигателях, газовых турбинах и других мощных силовых и энергетических установках предъявляет повышенные требования к материалам по их прочности, термостойкости и другим свойствам. Эти требования выполняются путем разработки специальных сталей с улучшенной структурой благодаря легированию марганцем, кремнием, ванадием, никелем, молибденом и другими химическими элементами. Требуемые свойства конструкционных сталей получаются в результате научно обоснованных методов и способов термической, термохимической обработок, специальных методов упрочнения и повышения пластичности.

Сегодня лопасти (лопатки) газотурбинных агрегатов выполняются из так называемых суперсплавов, сплавов на никелевой основе. Эти суперсплавы обладают длительной термостойкостью, при температурах до 1000°C сохраняют свои эксплуатационные свойства. Продолжается разработка новых жаропрочных, термостойких материалов, новых технологий их изготовления и применения (рис. 5).

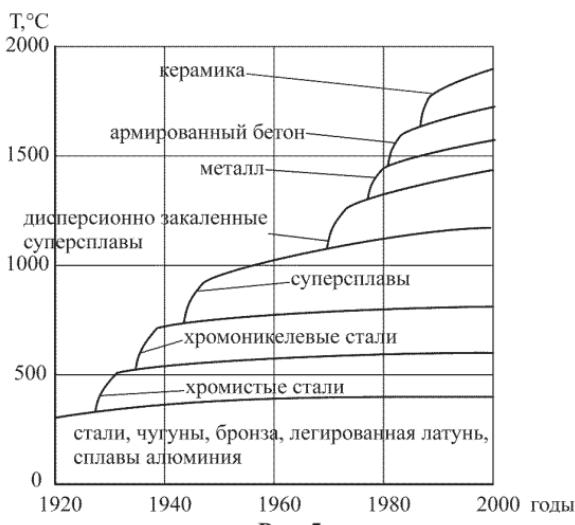


Рис. 5

Диаграмма совершенствования эксплуатационных свойств конструкционных материалов

Алюминиевые сплавы

Практические перспективы создания воздушного транспорта для перевозки грузов и пассажиров с высокими скоростями обусловили потребность в легких конструкционных материалах. Вероятно, можно назвать чудесным совпадением то, что одновременно с полетами первых аппаратов тяжелее воздуха, в 1909 году было открытие нового прочного и легкого сплава на основе алюминия, названного дюралиюминием. Добавка в расплавленный алюминий небольшого количества магния и меди привело к 5-кратному повышению прочности алюминиевого сплава по сравнению с прочностью чистого алюминия. Создание такого легкого и прочного сплава обеспечило дальнейшее развитие самолетостроения.

Алюминиевые сплавы характеризуются небольшим удельным весом (до 3 г/см³), хорошей обрабатываемостью, коррозионной стойкостью, высокими механическими свойствами после термической обработки и хорошими литейными свойствами.

Алюминиевые сплавы делятся на литейные, применяемые для изготовления деталей путем отливки и деформируемые, применяемые для изготовления листов, ленты, проволоки, фасонного профиля и деталей с помощью штамповки, ковки или прессовки.

Литейные алюминиевые сплавы — это сплавы алюминия с кремнием (силумин), содержащие также и другие элементы (медь, магний). Литейные сплавы маркируются так: АЛ1, АЛ2 и т. д. до АЛ18В (алюминиевый — литейный сплав). Широко применяются в моторостроении сплавы АЛ4 и АЛ5, подвергаемые упрочняющей термической обработке (закалке до температуры 520–530°C в воде и искусственному старению при температуре 170–180°C).

Сплавы с медью АЛ7, АЛ19 имеют высокие механические свойства при нормальной и повышенных температурах и хорошо обрабатываются резанием. Сплавы с магнием АЛ8, АЛ27 имеют хорошую коррозионную стойкость, повышенные механические свойства и хорошо обрабатываются резанием.

Деформируемые алюминиевые сплавы в виде листов, плит, прутков, профилей, труб и т. д. применяются в самолетостроении и в других отраслях машиностроения. Дуралюмины («дюраль», сплавы Д1, Д16, Д20 и др.) обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состояниях. Сплавы свариваются точечной сваркой и не свариваются сваркой плавлением.

В качестве деформируемых (для поковок и штамповки) применяют также сплавы марок АК2, АК4 и др. В состав этих сплавов, кроме меди, марганца и магния, входит небольшое количество никеля. Сплавы этого типа отличаются высокой пластичностью и удовлетворительными литейными свойствами, позволяющими получить качественные слитки. Алюминиевые сплавы этой группы хорошо обрабатываются резанием и удовлетворительно свариваются контактной и аргонодуговой сваркой.

Титановые сплавы

Титан и его сплавы производятся промышленностью и широко применяются в связи с развитием новой техники, прежде всего авиационной и ракетной. Свойства титана — малая плотность, достаточная прочность, высокая коррозионная стойкость, сравнительно большая распространенность в природе, позволяют считать его «металлом будущего», но в настоящее время существуют большие трудности извлечения титана из руд, его плавки и переработки слитков в полуфабрикаты и изделия.

Чистый титан обладает высокой температурой плавления (1668°C); температура его кипения — 3169°C. По плотности, равной 4,505 г/см³ при комнатной температуре, он занимает промежуточное место между железом и алюминием (табл. 1).

Таблица 1

Плотность и прочность титановых, алюминиевых сплавов и стали

| Сплавы | Предел прочности σ_b , МПа | Плотность ρ , г/см ³ | σ_b/ρ |
|--|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Титановые сплавы | | | |
| Малопрочные | 400...700 | 4,5...4,55 | 88...155 |
| Средней прочности | 700...1000 | 4,4...4,5 | 160...230 |
| Высокой прочности | > 1000 | 4,65...4,75 | > 230 |
| Алюминиевые сплавы | | | |
| Малопрочные (термически не упрочняемые) | 130...300 | 2,7 | 48...115 |
| Средней прочности (термически упрочняемые) | 350...500 | 2,85 | 120...1180 |
| Высокой прочности | > 500 | 2,85 | > 180 |
| Стали | | | |
| Углеродистые | 300...700 | 7,8 | 38...90 |
| Низколегированные | 400...850 | 7,8 | 90...100 |
| Среднелегированные (средней прочности) | 850...1500 | 7,8 | 100...200 |
| Высокопрочные | > 1500 | 7,8 | > 192 |

Титан и титановые сплавы обладают исключительно высоким сопротивлением коррозии, превышающим коррозионную стойкость нержавеющих сталей, так как на поверхности титана образуется плотная оксидная пленка. Он активно реагирует лишь с четырьмя неорганическими кислотами: плавиковой, соляной, серной и ортофосфорной. Титан и его сплавы устойчивы во всех природных условиях: атмосфере, почве, пресной и морской воде, даже в условиях жаркого влажного морского климата. Титан и титановые сплавы совместимы со многими органическими веществами. Они устойчивы к солнечной радиации, не требуют специальной защиты от воздействия природных условий (например, окраски лаками). Кроме этого на поверхности титана можно создавать слои различной цветовой гаммы, в частности путем регулируемого азотирования, оксидирования, ионно-плазменной обработки.

Характеристики механических свойств титана высокой чистоты: предел прочности $\sigma_b \approx 240$ МПа, $\delta \approx 60\%$, $\psi \approx 70\%$. Для получения данных характеристик механических свойств титан легируют алюминием, ванадием, марганцем, молибденом, хромом, железом и некоторыми другими элементами.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru